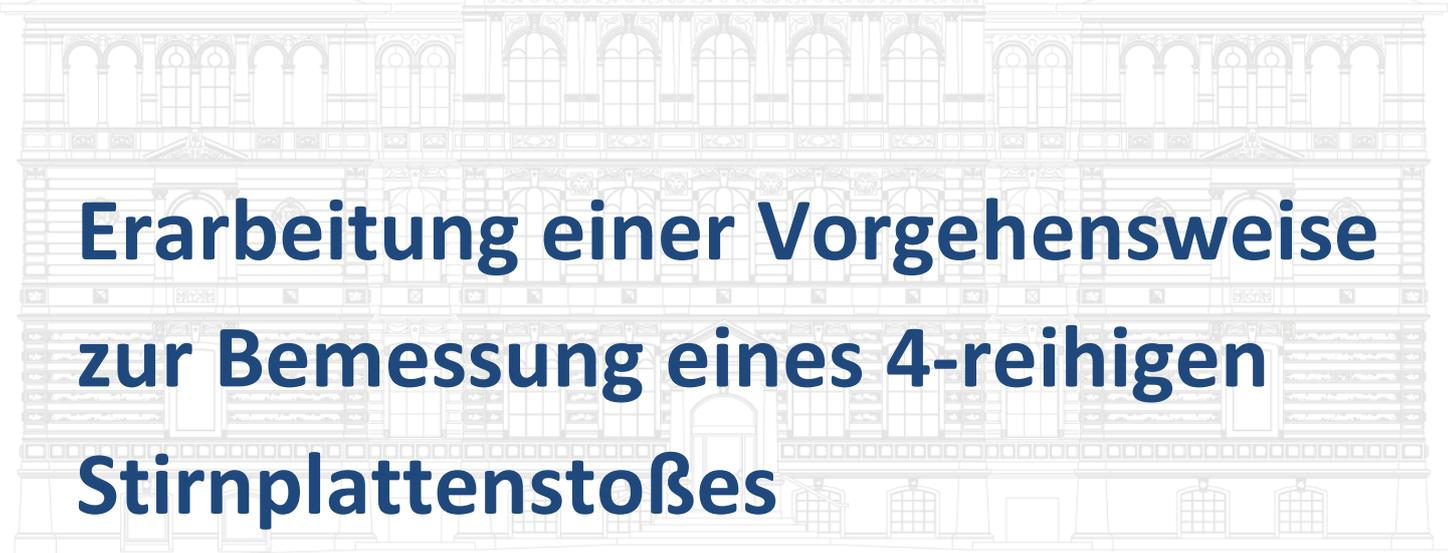


Technical Report

Nr. 9

hochschule 21 :



**Erarbeitung einer Vorgehensweise
zur Bemessung eines 4-reihigen
Stirnplattenstoßes**

Nils Vestrück

hochschule 21 - Technical report, Nr. 9

2017

hochschule 21- Technical report

Herausgeber:
hochschule 21 gemeinnützige GmbH
Staatlich anerkannte private Fachhochschule
Harburger Straße 6

21614 Buxtehude

Telefon: +49 4161 648 0

Fax: +49 4161 648 123

E-Mail: info@hs21.de

<http://www.hs21.de>

ISSN 2196-5153

Studiengang: Bauingenieurwesen DUAL

Bachelorarbeit

Erarbeitung einer Vorgehensweise
zur Bemessung eines
4-reihigen Stirnplattenstoßes

Abschlussarbeit zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Engineering (B. Eng.)

Vorgelegt von: Nils Vestrick

Abgabe am: 27.03.2017

Erstprüferin:

Prof. Dr.-Ing. Maritta Petersen
hochschule 21 gGmbH
Harburger Straße 6
21614 Buxtehude

Zweitprüfer:

Dipl.-Ing. Martin Göbel
Goldbeck Nord GmbH
Ummelner Straße 4-6
33649 Bielefeld

Zusammenfassung

Die Bemessung von zweireihigen geschraubten Stirnplattenstößen erfolgt im Stahlbau mit der Komponentenmethode nach der DIN EN 1993-1-8. Indem der Anschluss als eine Zusammenstellung der verschiedenen Einzelkomponenten betrachtet wird, können ohne weiteres Optimierungen hinsichtlich der Beanspruchbarkeit vorgenommen werden.

Für den zentralen Nachweis der Blechbiegung werden die sich um die Schrauben ausbildenden Fließlinienmuster ermittelt, um die Beanspruchbarkeit an einem äquivalenten T-Stummel-Modell berechnen zu können.

Für die Berechnung der Beanspruchbarkeit eines vierreihigen geschraubten Stirnplattenstoßes stellt die DIN EN 1993-1-8 jedoch kein Modell bereit, sodass in der Regel auf die „Typisierten Anschlüsse im Stahlhochbau nach DIN 1993-1-8“ zurückgegriffen werden muss.

In der Dissertation von Dr.-Ing. Björn Schmidt „Zum Tragverhalten von geschraubten momententragfähigen Stirnplattenverbindungen mit 4 Schrauben in jeder Schraubenreihe“ wird ein Bemessungsmodell für die Ermittlung der Beanspruchbarkeiten der Komponenten von vierreihigen Anschlusskonfigurationen hergeleitet. Auf dieser Grundlage wird in dieser Arbeit das Bemessungsmodell für eine Anwendung auf den vierreihigen Stirnplattenstoß vervollständigt.

Mit den erstellten Flussdiagrammen hat der Anwender die Möglichkeit das Grenzmoment für bündige und überstehende Stöße zu ermitteln. Die verschiedenen vorgerechneten Beispiele gewährleisten die Verständlichkeit des Rechenwegs.

Über die vorgenommene Auswertung der Beispiele wird dem Leser ein umfassendes Verständnis der Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Komponenten und der Beanspruchbarkeit bereitgestellt.

Abstract

The DIN EN 1993-1-8 includes a design model (component method) for beam splices which are connected by two vertical rows of high strength bolts. By determining the resistance of the joint as the composition of the individual components the resistance can be improved in accordance with the conditions.

For the central proof of the end plate in bending, in order to be able to calculate the resistance of the t-stub-model the yield line patterns around the screws are determined.

The DIN EN 1993-1-8 does not provide a model for the proof of the resistance of an end plate with four vertical rows of bolts, therefore the “Standardised Joints in Steel Structures to DIN EN 1993-1-8” have to be used.

In the dissertation by Dr.-Ing. Björn Schmidt “Zum Tragverhalten von geschraubten momententragfähigen Stirnplattenverbindungen mit 4 Schrauben in jeder Schraubenreihe” (for the bearing behaviour of bolted moment resistant joints with 4 bolts in each horizontal row), a design model for the determination of the resistance of the components of a four-row connection is provided. On this basis, the design model for an application on four-row beam splices is completed in this work.

With the flow charts created, the user is able to determine the moment resistance for beam splices with flush and extended end plates. The various reckoned examples ensure the comprehensibility of the calculation process.

Through the evaluation of the examples, the reader is provided with a comprehensive understanding of the dependencies between the various components and the joint resistant.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
2	ALLGEMEIN	1
2.1	Arten geschraubter biegesteifer Stöße	1
2.1.1	Laschenstoß	1
2.1.2	Stirnplattenstoß	2
2.2	Komponentenmethode	3
2.2.1	Allgemein	3
2.2.2	Das äquivalente T-Stummel Modell	4
2.2.2.1	Versagensmodi	4
2.2.2.2	Exkurs: Abstützkraft	9
2.2.2.3	Komponente 5: Stirnplatte mit Biegebeanspruchung	12
2.2.2.4	Komponente 7: Trägerflansch und -steg mit Druckbeanspruchung	12
2.2.2.5	Komponente 8: Trägersteg mit Zugbeanspruchung	13
2.2.2.6	Komponente 10: Schrauben mit Zugbeanspruchung	14
2.2.2.7	Komponente 19: Schweißnähte	15
2.2.3	Beanspruchbarkeit	17
2.2.3.1	Grenztragfähigkeit in der Trägerkammer	17
2.2.3.2	Grenztragfähigkeit im Stirnplattenüberstand	17
2.2.3.3	Summierte Grenztragfähigkeit	17
2.2.3.4	Biegetragfähigkeit	18
2.2.3.5	Exkurs: Rotationskapazität des zweireihigen Stoßes	21
2.2.3.6	Exkurs: Vereinfachtes Verfahren nach DIN EN 1993-1-8	23
2.2.3.7	Normalkrafttragfähigkeit	23
2.2.3.8	Interaktionsnachweis Normalkraft mit Biegung	25
2.2.3.9	Interaktionsnachweis Querkraft mit Normalkraft und Biegung	26
3	FLIEßLINIEN	30
3.1	Grundformen	30
3.2	Exkurs: Herleitung des nicht kreisförmiges Fließlinienmuster	30
3.3	Gruppen	37
3.4	Steifen	39
3.5	Plattenrand	40
3.6	Fließlinien im Stirnplattenüberstand	41
3.7	Fließlinien in der Trägerkammer	41
3.8	Exkurs: Gewichteter Lastabtrag	42
3.9	Exkurs: Ermittlung der Mindestschweißnahtdicken für den 2-reihigen Stoß	44
4	BEISPIELE 2-REIHIGER STOß	46
4.1	Bezeichnung	46
4.2	Allgemein	47
4.3	Beispiel 1 – bündiger 2-reihiger Stoß	48
4.3.1	Anschlussgeometrie	48
4.3.2	Berechnung	49
4.4	Beispiel 2 – überstehender 2-reihiger Stoß	52
4.4.1	Anschlussgeometrie	52
4.4.2	Berechnung	53
5	ERWEITERUNG AUF DEN 4-REIHIGER STOß	59
5.1	Allgemein	59
5.2	Modell nach Dr.-Ing. Björn Schmidt	59
5.2.1	Vorstellung	59
5.2.2	Fließlinien im Stirnplattenüberstand	60

5.2.3	Fließlinien in der Trägerkammer.....	61
5.2.3.1	Fließlinienmuster im Allgemeinen	61
5.2.3.2	Herleitung des Fließmusters neben einer Steife	62
5.2.4	Grenztragfähigkeit im Stirnplattenüberstand.....	67
5.2.5	Grenztragfähigkeit in der Trägerkammer.....	68
5.2.5.1	reines Flanschfließen - Modus 1	68
5.2.5.2	kombiniertes Versagen von Platte und Schraube – Modus 2	72
5.2.5.3	Schraubenversagen – Modus 3	77
5.3	Exkurs: Ermittlung der Mindestschweißnahtdicken für den 4-reihigen Stoß.....	78
5.4	Rotationskapazität des 4-reihigen Stoßes	80
6	BEISPIELE 4-REIHIGER STOß	82
6.1	Bezeichnung.....	82
6.2	Allgemein	83
6.3	Beispiel 3 – bündiger 4-reihiger Stoß.....	84
6.3.1	Anschlussgeometrie.....	84
6.3.2	Berechnung.....	85
6.4	Beispiel 4 – überstehender 4-reihiger Stoß.....	93
6.4.1	Anschlussgeometrie.....	93
6.4.2	Berechnung.....	94
7	AUSWERTUNG DER BEISPIELE.....	104
7.1	Einfluss der Komponenten auf die Biegetragfähigkeit.....	104
7.2	Vergleich mit den typisierten Verbindungen.....	106
8	FAZIT	109
9	LITERATURVERZEICHNIS.....	110
10	FLUSSDIAGRAMME	112
10.1	Flussdiagramm 2-reihiger bündiger Stoß.....	113
10.2	Flussdiagramm 2-reihiger überstehender Stoß.....	116
10.3	Flussdiagramm 4-reihiger bündiger Stoß.....	119
10.4	Flussdiagramm 4-reihiger überstehender Stoß.....	122

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 : geschraubter Laschenstoß eines I-Trägers	1
Abbildung 2 : 3 verschiedene 2-reihige Stirnplattenstöße	2
Abbildung 3 : Komponentenummerierung für einen Stirnplattenstoß nach DIN EN 1993-1-8	3
Abbildung 4 : Herleitung des T-Stummel-Modells	4
Abbildung 5 : Ermittlung der Schraubendehnlänge	5
Abbildung 6 : Versagensmodell 1 mit Abstützkraft	6
Abbildung 7 : Versagensmodell 2 mit Abstützkraft	7
Abbildung 8 : Versagensmodell 1 und 2 ohne Abstützkraft	8
Abbildung 9 : Versagensmodell 3	8
Abbildung 10: Verformung des T-Stummels ohne (Fall 1) und mit (Fall 2) Abstützkraft	9
Abbildung 11: Randbedingungen für die zweifache Integration der Krümmung zur Ermittlung der Verschiebung	9
Abbildung 12: Momentenverlauf im T-Stummel (für Fall 2, dass eine Abstützkraft auftritt)	10
Abbildung 13: Biegebeanspruchung der Stirnplatte	12
Abbildung 14: Druckbeanspruchung des Trägerflansches	12
Abbildung 15: Zugbeanspruchung des Trägersteges	13
Abbildung 16: Zugbeanspruchung der Schraube	14
Abbildung 17: berücksichtigte Spannungen in der Kehlnaht	15
Abbildung 18: senkrecht zur Achse beanspruchte 90° Doppelkehlnaht	16
Abbildung 19: Tragverhalten des bündigen Stoßes unter Biegebeanspruchung	18
Abbildung 20: elastisches Tragverhalten des überstehenden Stoßes unter Biegebeanspruchung	19
Abbildung 21: plastisches Tragverhalten des überstehenden Stoßes unter Biegebeanspruchung	20
Abbildung 22: Klassifizierung von Anschlüssen nach ihrer Steifigkeit [3]	21
Abbildung 23: äquivalente Federsteifigkeit und äquivalenter Hebelarm	22
Abbildung 24: Vereinfachtes Berechnungsmodell bei überstehenden Stirnplattenstößen	23
Abbildung 25: Ermittlung der Zugtragfähigkeit für den bündigen, einseitig überstehenden und zweiseitig überstehenden Stoß	24
Abbildung 26: individuelles Fließlinienmuster	30
Abbildung 27: individuelles nicht kreisförmiges Fließlinienmuster	30
Abbildung 28: dreidimensionale Darstellung des nicht kreisförmigen Fließlinienmusters	30
Abbildung 29: Ersatzstabmodell der äußeren Arbeit	31
Abbildung 30: geometrische Randbedingungen für das nicht kreisförmige Fließlinienmuster	31
Abbildung 31: Beziehung φ zu δ bei der Fließlinie 1	31
Abbildung 32: geometrische Herleitung von $I\varphi^2$	32
Abbildung 33: geometrische Herleitung von φ^4	33
Abbildung 34: geometrische Herleitung der Einflussgrößen für φ^4	33
Abbildung 35: geometrische Herleitung von c	34
Abbildung 36: Rotationsdreieck zur Herleitung von φ^5 mit dem Sinussatz	35
Abbildung 37: kreisförmiges Fließlinienmuster als Beginn einer Gruppe	38
Abbildung 38: nicht kreisförmiges Fließlinienmuster als Beginn einer Gruppe	38
Abbildung 39: Innerer Teil eines kreisförmigen Gruppenmusters	38
Abbildung 40: innerer Teil eines nicht kreisförmigen Gruppenmusters	38
Abbildung 41: einzelnes Fließlinienmuster neben einer Steife	40
Abbildung 42: Beginn eines Gruppenmusters neben einer Steife	40
Abbildung 43: kreisförmiges Fließlinienmuster am Plattenrand	40
Abbildung 44: nicht kreisförmiges Fließlinienmuster am Plattenrand	40
Abbildung 45: Beginn einer Gruppe am Plattenrand (hier speziell Stirnplattenüberstand)	40
Abbildung 46: Geometriebezeichnung im Stirnplattenüberstand	41
Abbildung 47: Geometriebezeichnung in der Trägerkammer	41

Abbildung 48: Ersatzstabmodell zur Steifigkeitsermittlung beim 2-reihigen Stirnplattenstoß	42
Abbildung 49: Lastverteilung in der Trägerkammer	43
Abbildung 50: Bezeichnung der geometrischen Abmessungen 2-reihig nach DIN EN 1993-1-8 [6] und Typisierte Anschlüsse im Stahlhochbau [15]	46
Abbildung 51: Bezeichnung der geometrischen Abmessungen 2-reihig nach Björn Schmidt [14]	46
Abbildung 52: Beispiel 1: Anschlussgeometrien [mm]	48
Abbildung 53: Beispiel 2: Anschlussgeometrien [mm]	52
Abbildung 54: 3 Beispiele für 4-reihige Stirnplattenstöße.....	59
Abbildung 55: Für 4-reihige Anschlüsse erweiterte Fließlinienmuster im Stirnplattenüberstand.....	60
Abbildung 56: links: überschätzte Fließlinienlänge rechts: angepasstes Fließmuster für schmalflanschige Träger.....	61
Abbildung 57: Für 4-reihige Anschlüsse erweiterte Fließlinienmuster in der Trägerkammer .	61
Abbildung 58: Fließlinienmuster in der Trägerkammer des 4-reihigen Stoßes neben dem Flansch.....	62
Abbildung 59: Verdrehungsbeziehung Fließlinie 1	63
Abbildung 60: Ersatzstabmodell für die Lastabtragrichtung Steg	65
Abbildung 61: Ersatzstabmodell für die Lastabtragrichtung Flansch.....	65
Abbildung 62: Ersatzstabmodell zur Steifigkeitsermittlung	68
Abbildung 63: Zweiachsiges Versagensmodell für 4 Schrauben in einer Schraubenreihe (Modus 1)	70
Abbildung 64: T- und L-Stummel-Modell	71
Abbildung 65: Übertragung von T- auf L-Stummel-Modell (Modus 1 – Modus 4).....	71
Abbildung 66: Ansatz zum Zweiachsiges Versagensmodell für 4 Schrauben in einer Schraubenreihe (Modus 2)	72
Abbildung 67: Zweiachsiges Versagensmodell für 4 Schrauben in einer Schraubenreihe (Modus 2)	73
Abbildung 68: Ersatzstabmodell für den Versagensmodus 2 (vgl. Abbildung 62).....	74
Abbildung 69: Lastverteilung bei schmal- und breitflanschigen Profilen.....	75
Abbildung 70: Übertragung von T- auf L-Stummel-Modell (Modus 2 – Modus 5).....	77
Abbildung 71: Modus 3 für das L-Stummel-Modell	77
Abbildung 72: Bezeichnung der geometrischen Abmessungen gemäß Björn Schmidt	82
Abbildung 73: Bezeichnung der geometrischen Abmessungen gemäß DIN EN 1993-1-8 und Typisierte Verbindungen.....	82
Abbildung 74: Beispiel 3: Anschlussgeometrien [mm]	84
Abbildung 75: Zweiachsiges Versagensmodell für 4 Schrauben in einer Schraubenreihe (Modus 1) (vgl. Abbildung 63).....	88
Abbildung 76: Zweiachsiges Versagensmodell für 4 Schrauben in einer Schraubenreihe (Modus 2) (vgl. Abbildung 67).....	89
Abbildung 77: Beispiel 4: Anschlussgeometrien [mm]	93
Abbildung 78: Zweiachsiges Versagensmodell für 4 Schrauben in einer Schraubenreihe (Modus 1) (vgl. Abbildung 63).....	96
Abbildung 79: Zweiachsiges Versagensmodell für 4 Schrauben in einer Schraubenreihe (Modus 2) (vgl. Abbildung 67).....	97

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Schraubenparameter x [3].....	5
Tabelle 2: Vergleich von Schraubenzugbeanspruchbarkeit und Durchstanzwiderstand.....	14
Tabelle 3: Beispiel 1: Anschlussgeometrien [mm].....	48
Tabelle 4: Beispiel 2: Anschlussgeometrien [mm].....	52
Tabelle 5: Beispiel 3: Anschlussgeometrien [mm].....	84
Tabelle 6: Beispiel 4: Anschlussgeometrien [mm].....	93
Tabelle 7: Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den typisierten Verbindungen.....	106
Tabelle 8: Vergleich der typisierten Verbindungen mit dem Modell nach Björn Schmidt und dem in dieser Arbeit von mir erweiterten Modell	108

Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: Fließlinienlängendiagramm für baupraktische Geometrien.....	37
Diagramm 2: Ermittlung von Alpha	39
Diagramm 3: Beispiel 1: Alpha-Wert.....	49
Diagramm 4: Beispiel 2: Alpha-Wert.....	53
Diagramm 5: Abhängigkeit der Biegetragfähigkeit von der Stirnplattendicke (Stoß ähnlich: Typisierte Verbindung Nr.497 HEA 400 IH4.1 M24).....	104
Diagramm 6: Abhängigkeit der Biegetragfähigkeit vom Schraubendurchmesser (Stoß ähnlich: Typisierte Verbindung Nr.497 HEA 400 IH4.1 $t_p=30\text{mm}$).....	105

1 Einleitung

Der biegesteife Stirnplattenstoß als Momente, Querkräfte und Normalkräfte übertragender Anschluss kommt in der Baupraxis häufig zum Einsatz. Anschlüsse mit I-Querschnitten werden normativ in der DIN EN 1993-1-8 geregelt. Das in der Norm beschriebene Bemessungskonzept für den Anschluss eines Trägers an eine Stütze lässt sich ohne weiteres auf den Stoß von zwei Trägern übertragen.

Zusätzlich zu den in der Norm geregelten Anschlüssen mit zwei Schrauben in jeder Schraubenreihe, kann es sich als wirtschaftlich oder konstruktiv erforderlich erweisen den biegesteifen Stirnplattenstoß mit vier Schrauben in jeder Schraubenreihe auszuführen. Die Bemessung dieser vierreihigen Stirnplattenstöße wird in der DIN EN 1993-1-8 nicht beschrieben, so dass in der Baupraxis auf andere Literatur zurückgegriffen werden muss.

Das auf der Grundlage des Bemessungsmodells für zweireihige Anschlüsse erstellte Ringbuch „Typisierte Anschlüsse im Stahlhochbau – Band 2“ [1] liefert für die Bemessung von vierreihigen Stirnplattenstößen kein Bemessungsmodell. In der Dissertation von Dr.-Ing. Björn Schmidt wurde die in der DIN EN 1993-1-8 [2] geregelte Komponentenmethode um eine Anwendung auf vierreihige momententragfähige Stirnplattenstöße erweitert.

Das von Dr.-Ing. Björn Schmidt entwickelte Bemessungsverfahren soll in dieser Arbeit vorgestellt, näher erläutert, angewendet und gegebenenfalls erweitert werden.

2 Allgemein

2.1 Arten geschraubter biegesteifer Stöße

2.1.1 Laschenstoß

Grundsätzlich wird beim geschraubten biegesteifen Stoß zwischen zwei Ausführungsmöglichkeiten unterschieden. Der Laschenstoß stellt eine der beiden Möglichkeiten dar. Ohne genauer auf verschiedene Abwandlungen des Laschenstoßes einzugehen, besteht der Laschenstoß aus zwei Laschen jeweils auf der Außenseite der beiden Flansche und zwei Laschen auf den beiden Seiten des Steges. Die beiden Laschen an den Flanschen können die in den Flanschen

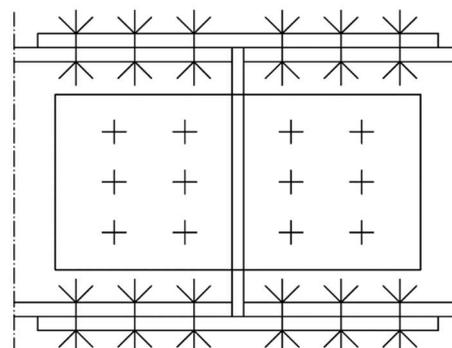


Abbildung 1: geschraubter Laschenstoß eines I-Trägers

befindlichen Zug- und Druckkräfte aus einer Normalkraft- und Momentenbeanspruchung übertragen. Die Stegfaschen werden dann vereinfacht nur für die Querkraft nachgewiesen.

2.1.2 Stirnplattenstoß

Die zweite Ausführungsvariante eines geschraubten biegesteifen Stoßes ist der Stirnplattenstoß (auch Kopfplattenstoß genannt). Der geschraubte Stirnplattenstoß besteht aus zwei Stirnplatten, welche jeweils mit einem Träger verschweißt und mit der jeweils anderen Stirnplatte verschraubt werden. Die Zugkräfte werden vom gezogenen Flansch und einem mittragenden Steganteil über Schweißnähte in die Stirnplatte eingeleitet, welche die Kräfte dann an die Schrauben weiterleitet. Die Druckkräfte werden über Kontakt vom druckbeanspruchten Flansch über die Stirnplatten direkt durchgeleitet. Die Querkraft wird vom Steg, den zugehörigen Schweißnähten und über die am wenigsten beanspruchte Schraubenreihe übertragen.

Bei Goldbeck kommen verschiedene Ausführungsvarianten des zweireihigen biegesteifen Stirnplattenstoßes zum Einsatz. Dazu zählen unter andern folgende:

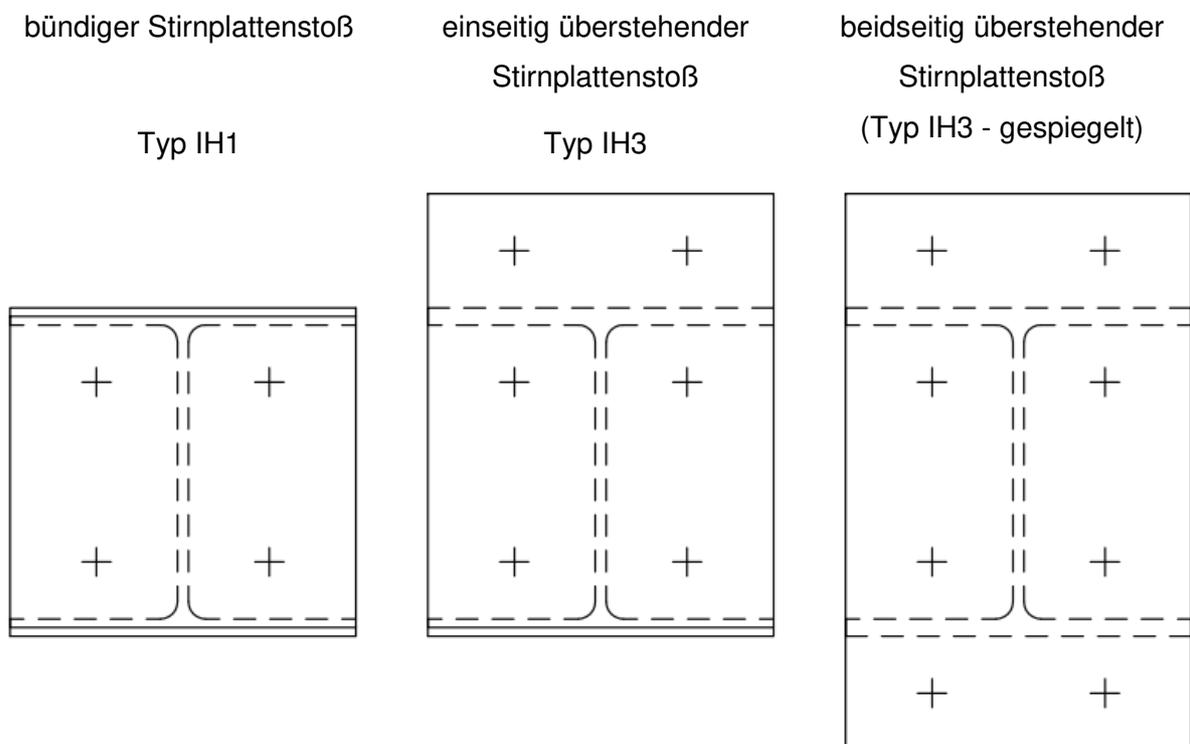


Abbildung 2: 3 verschiedene 2-reihige Stirnplattenstöße

Der bündige Stirnplattenstoß findet in der Regel bei kleineren Lasten Anwendung und kann keine besonders großen Biegemomente übertragen.

Der einseitig überstehende Stirnplattenstoß kann je nach Ausrichtung (unten oder oben überstehend) entweder große positive oder große negative Biegemomente übertragen.

Der beidseitig überstehende Stirnplattenstoß kann sowohl große positive als auch große negative Biegemomente übertragen. Zusätzlich eignet sich dieser Stoß aus Symmetriegründen auch besonders gut fürs Übertragen von großen Zugkräften.

2.2 Komponentenmethode

2.2.1 Allgemein

Die DIN EN 1993-1-8 enthält für den Anschluss von Trägern als I-Querschnitt an eine Stütze als I-Querschnitt ein Berechnungsverfahren. Die verwendete erstmals normativ erfasste Darstellung (vgl. Abbildung 3) eines Anschlusses als eine Zusammenstellung seiner Grundkomponenten kann auf den Stirnplattenstoß von zwei Trägern übertragen werden.

Um die Tragfähigkeit des Anschlusses ermitteln zu können müssen die Beanspruchbarkeiten jeder Komponente bestimmt werden. Die kleinste ermittelte Beanspruchbarkeit stellt die versagende Komponente dar. Sollte die ermittelte Beanspruchbarkeit unter der vorgegebenen Beanspruchung liegen lässt sich ohne weiteres ermitteln welche Komponente zu verstärken ist.

Die Komponenten für den Stirnplattenstoß sind:

- 5 - Stirnplatte mit Biegebeanspruchung
- 10 - Schraube mit Zugbeanspruchung
- 8 - Trägersteg mit Zugbeanspruchung
- 19 - Schweißnähte
- 11 - Schraube mit Schubbeanspruchung
- 7 - Trägerflansch und –steg mit Druckbeanspruchung

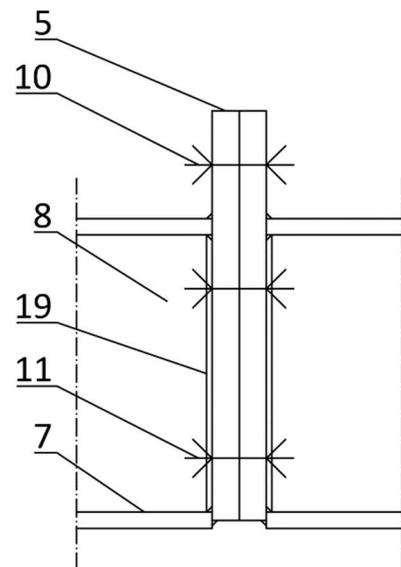


Abbildung 3:
Komponentennummerierung für
einen Stirnplattenstoß nach
DIN EN 1993-1-8

2.2.2 Das äquivalente T-Stummel Modell

2.2.2.1 Versagensmodi

Die auf Zug beanspruchten Schrauben der oben beschriebenen Stöße rufen in der Stirnplatte eine Biegung hervor. Um die Tragfähigkeit der auf Biegung beanspruchten Stirnplatte erfassen zu können, wird der äquivalente T-Stummel als theoretisches Ersatzmodell gebildet.

Weil sich das symmetrische T-Stummel-Modell in seiner Mitte nicht verdreht, lässt sich dieses für beiden Hälften einzeln betrachten. (Vgl. Abbildung 4) Die für die Schraubenreihe zu übertragene Zugkraft wird auf beide Hälften aufgeteilt, sodass diese jeweils am Nahtansatzpunkt eingeleitet werden muss.

Für die Versagensmodi 1 und 2 (siehe folgende Seiten) muss zwischen T-Stummeln mit und ohne Abstützkraft Q unterschieden werden. Am Rand der Platte treten Abstützkräfte auf, wenn die Bedingung

$$L_b \leq L_b^* \quad (2-1)$$

erfüllt ist.

$$L_b^* = \frac{8,8 \times m^3 \times A_s \times n_b}{\sum l_{eff,1} \times t_p^3} \quad (2-2)$$

- L_b - Schraubendehnlänge
- L_b^* - maximale Schraubendehnlänge, bei welcher eine Abstützkraft auftritt
- m - Abstand der Schraubenachse zum Nahtansatzpunkt
- A_s - Spannungsquerschnittsfläche der Schraube
- n_b - Anzahl der Schrauben im betrachteten T-Stummel
- $l_{eff,1}$ - effektive Länge des T-Stummels für Modus 1

Die Herleitung dieser Abgrenzung folgt im nächsten Unterkapitel (2.2.2.2 Exkurs: Abstützkraft)

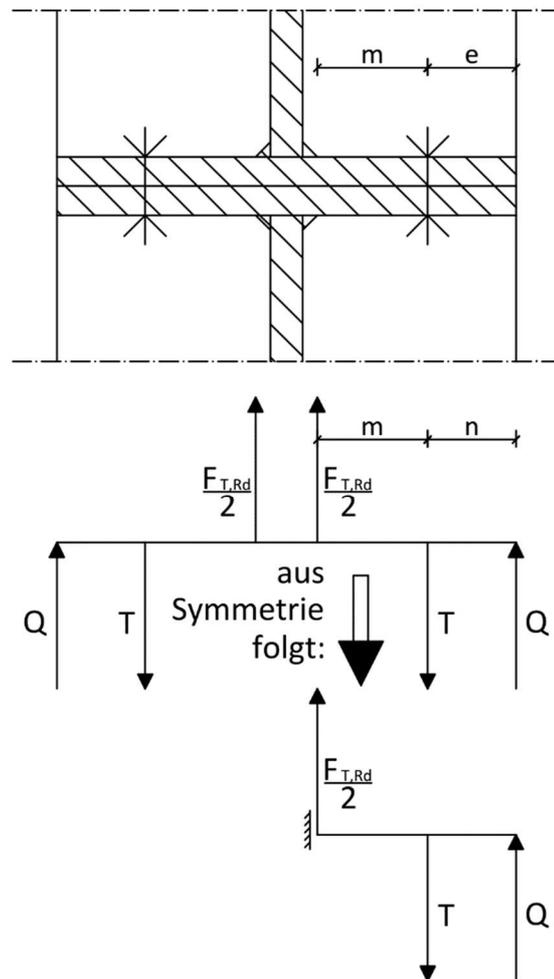


Abbildung 4: Herleitung des T-Stummel-Modells

Die Schraubendehnlänge L_b setzt sich aus der Gesamtdicke des Blechpaketes (hier zwei Stirnplatten), den Unterlegscheiben, der halben Kopfhöhe und der halben Mutterhöhe zusammen. (vgl. Abbildung 5)

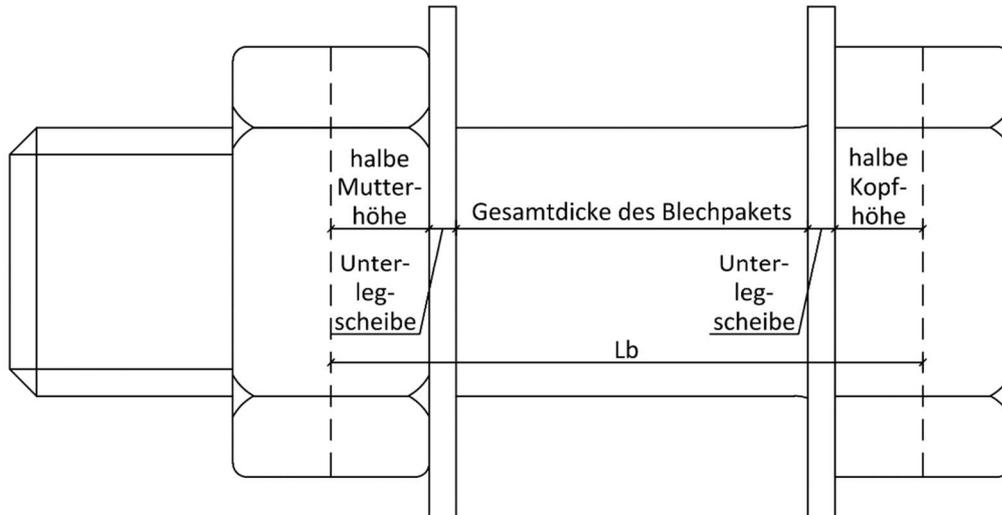


Abbildung 5: Ermittlung der Schraubendehnlänge

$$L_b = 2 \times t_p + 2 \times t_u + \frac{t_k}{2} + \frac{t_m}{2} \quad (2-3)$$

- t_p - Stirnplattendicke
- t_u - Unterlegscheibendicke
- t_k - Schraubenkopfdicke
- t_m - Mutterdicke

Die in der DIN EN 14399-4 geregelten Hochfesten Schrauben und die in der DIN EN 14399-6 geregelten Unterlegscheiben haben für die verschiedenen Schraubendurchmesser jeweils genormte Dicken.

Für die verschiedenen Schraubendurchmesser lassen sich die Geometrien der jeweiligen Schraubengarnituren zusammenfassen. Die zusammengefasste Dicke der zwei Unterlegscheiben, der halben Kopfhöhe und der halben Mutterhöhe lassen sich aus Tabelle 1 entnehmen:

$$x = 2 \times t_u + \frac{t_k}{2} + \frac{t_m}{2} \quad (2-4)$$

sodass:

$$L_b = x + 2 \times t_p \quad (2-5)$$

- x - Schraubenparameter nach Tabelle 1

Schraubengröße	X [cm]
M12	1,50
M16	1,95
M20	2,25
M24	2,55
M27	2,95
M30	3,15
M36	3,80

Tabelle 1: Schraubenparameter x [3]

Die verschiedenen Versagensmodi

Für den T-Stummel werden verschiedene Modelle gebildet, welche einen Versagenszustand des selbigen darstellen. Für den zweireihigen Stirnplattenstoß wird zwischen insgesamt vier Modi unterschieden.

Versagensmodus 1 mit Abstützkraft:

Beim Versagensmodus 1 wird davon ausgegangen, dass es zum Plattenfließen kommt. (vgl. Abbildung 6) Die Schrauben verlieren ihre Tragfähigkeit nicht, aber die Stirnplatte versagt entlang der entsprechenden Fließlinie auf Biegung. Dieser Versagensmodus tritt in der

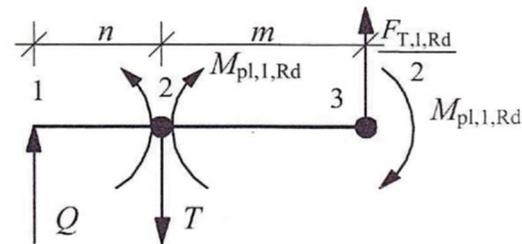


Abbildung 6: Versagensmodell 1 mit Abstützkraft

Regel bei geringen Plattendicken auf. Die Zugbeanspruchbarkeit für den Versagensmodus 1 ermittelt sich über die Summe der Momente um die rechte Seite des Fließgelenks in Punkt 2.

$$\sum M_2 = 0 = M_{pl,1,Rd} + M_{pl,1,Rd} - \frac{F_{T,1,Rd}}{2} \times m \quad (2-6)$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \times M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 \times m_{pl,Rd} \times \sum l_{eff,1}}{m} \quad (2-7)$$

$F_{T,1,Rd}$ - Zugtragfähigkeit des T-Stummels für den Versagensmodus 1

$m_{pl,Rd}$ - plastische längenbezogene Biegetragfähigkeit

$l_{eff,1}$ - äquivalente Fließlinienlänge des T-Stummels für den Versagensmodus 1

$$l_{eff,1} = \min(l_{eff,cp}; l_{eff,nc}) \quad (2-8)$$

$l_{eff,cp}$ - äquivalente Fließlinienlänge eines kreisförmigen Fließlinienmusters

$l_{eff,nc}$ - äquivalente Fließlinienlänge eines nicht kreisförmigen Fließlinienmusters

In 2-7 lässt sich die plastische Momententragfähigkeit der Stirnplatte über die zugehörigen wirksamen Längen und die längenbezogene Biegetragfähigkeit ermitteln. [4]

$$M_{pl,Rd} = m_{pl,Rd} \times \sum l_{eff} \text{ mit:} \quad (2-9)$$

$$m_{pl,Rd} = 0,25 \times t_p^2 \times \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2-10)$$

l_{eff} - effektive Länge des maßgebenden Fließmusters

f_y - Streckgrenze der Stirnplatte

γ_{M0} - Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchbarkeit von Querschnitten (gemäß DIN EN 1993-1-1/NA) = 1,0 [5]

Versagensmodus 2 mit Abstützkraft:

Der Versagensmodus 2 wird als kombiniertes Versagen von Stirnplatte und Schrauben beschrieben. (vgl. Abbildung 7) Dieser Modus tritt dann ein, wenn durch ein sich an Punkt 3 ausbildendes Fließgelenk die Grenzzugkraft der Schraube überschritten wird. Die Zugbeanspruchbarkeit für den Versagensmodus 2 ermittelt sich über die Summe der Momente um den Punkt 1.

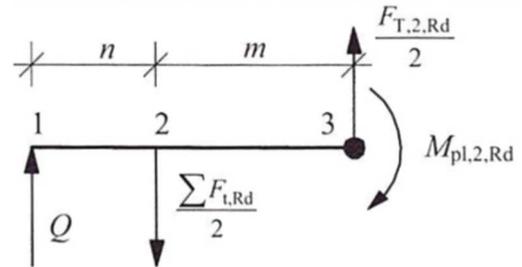


Abbildung 7: Versagensmodell 2 mit Abstützkraft

$$\sum M_1 = 0 = M_{pl,2,Rd} + \frac{n}{2} \times F_{t,Rd} - \frac{F_{T,2,Rd}}{2} \times (m + n) \quad (2-11)$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 \times M_{pl,2,Rd} + n \times \sum F_{t,Rd}}{m + n} \quad (2-12)$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 \times m_{pl,Rd} \times \sum l_{eff,2} + n \times \sum F_{t,Rd}}{m + n}$$

$F_{T,2,Rd}$ - Zugtragfähigkeit des T-Stummels für den Versagensmodus 2

$l_{eff,2}$ - äquivalente Fließlinienlänge des T-Stummels für den Versagensmodus 2

n - Abstand der Schraubenachse zur Abstützkraft

$$l_{eff,2} = l_{eff,nc}$$

Der Abstand zwischen der Schraubenachse und der Abstützkraft entspricht in der Regel dem Randabstand der Schraube, jedoch kann sich die Abstützkraft nicht beliebig weit von der Schraubenachse entfernen, sodass gilt:

$$n = e_{\min} \leq 1,25 \times m \quad (2-13)$$

e_{\min} - Randabstand der Schraube

Versagensmodi 1 und 2 ohne Abstützkraft:

Wenn nach Gleichung 2-1 keine Abstützkraft auftritt, kann sich keiner der beiden oben dargestellten Versagensmodi einstellen. Ohne Abstützkraft kann sich stattdessen der durch ein Flanschfließen ohne Schraubenversagen hervorgerufene, in Abbildung 8 dargestellte, Versagensmodus einstellen. Die Grenz-

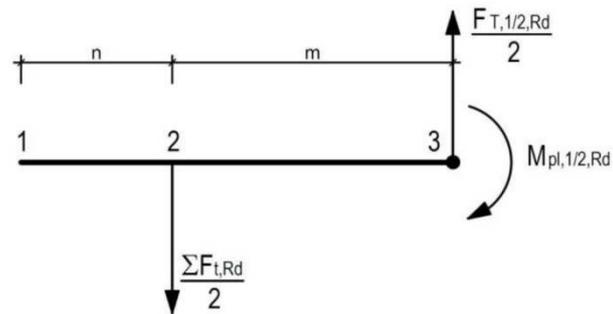


Abbildung 8: Versagensmodell 1 und 2 ohne Abstützkraft

zugkraft für dieses als Versagensmodi 1 und 2 ohne Abstützkraft bezeichnete Modell ermittelt sich über die Summe der Momente um den Punkt 2.

$$\sum M_2 = 0 = M_{pl,1/2,Rd} - \frac{F_{T,1/2,Rd}}{2} \times m \quad (2-14)$$

$$F_{T,1-2,Rd} = \frac{2 \times M_{pl,1/2,Rd}}{m} = \frac{2 \times m_{pl,Rd} \times \sum l_{eff,1}}{m} \quad (2-15)$$

$F_{T,1-2,Rd}$ - Zugtragfähigkeit des T-Stummels für die Versagensmodi 1 und 2 ohne Abstützkraft

Versagensmodus 3

Das alleinige Versagen der Schrauben wird durch den Versagensmodus 3 berücksichtigt. Der Versagensmodus 3 tritt in der Regel bei Konstruktionen mit dicken Stirnplatten und kleinen Schrauben auf.

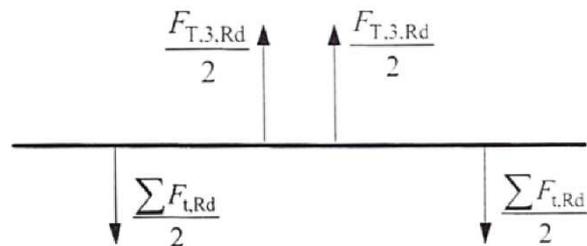


Abbildung 9: Versagensmodell 3

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} \quad (2-16)$$

$F_{T,3,Rd}$ - Zugtragfähigkeit des T-Stummels für den Versagensmodus 3

2.2.2.2 Exkurs: Abstützkraft

Für die Ermittlung der Beanspruchbarkeit des T-Stummels wird zwischen zwei Fällen unterschieden. Im ersten Fall separieren sich die verformenden T-Stummel vollständig voneinander. (vgl. Abbildung 10) Im zweiten Fall berühren sich die beiden äußeren Kanten des T-Stummels, sodass diese sich gegeneinander Abstützen und die Schrauben mit einer zusätzlichen Abstützkraft beanspruchen.

Für den ersten Fall, dass keine Abstützkräfte auftreten ergibt sich die Endverformung des T-Stummels aus einem Schrauben- und einem Plattenanteil.

Für den zweiten Fall lässt sich die Krümmung im T-Stummel (vgl. Abbildung 11) über die Näherungsgleichung

$$\delta'' = \frac{M}{E \times I_p} \quad \text{beschreiben.} \quad (2-17)$$

δ'' - Krümmung

M - Moment

E - Elastizitätsmodul

I_p - Plattenträgheitsmoment

Werden die Abschnitte links- und rechtsseitig der Schraube einzeln betrachtet, lässt sich der Momentenverlauf ergänzen:

für Teil 1:

$$\begin{aligned} +\overset{\curvearrowright}{M}_1(x) &= -\left(\frac{F}{2} + Q\right) \times (-x) + Q \times (n + (-x)) \\ &= \frac{F}{2} \times x + Q \times x - Q \times x + Q \times n \\ &= \frac{F}{2} \times x + Q \times n \end{aligned}$$

$+\overset{\curvearrowright}{M}_1(x)$ - Moment im Teil 1 bei x

F - Zugkraft in der Schraube

Q - Abstützkraft

x - Laufparameter mit Ursprung in der Schraubenachse

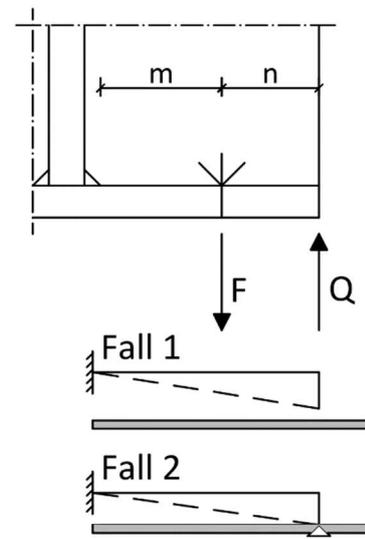


Abbildung 10: Verformung des T-Stummels ohne (Fall 1) und mit (Fall 2) Abstützkraft

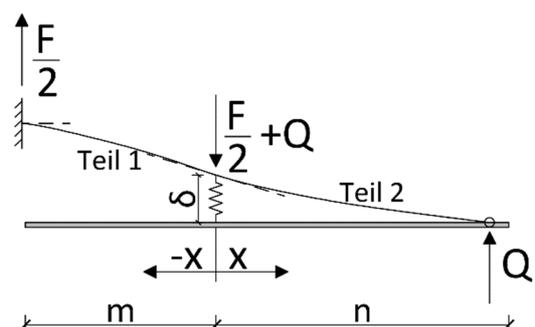


Abbildung 11: Randbedingungen für die zweifache Integration der Krümmung zur Ermittlung der Verschiebung

$$\delta''_1(x) = \frac{\frac{F}{2} \times x + Q \times n}{E \times I_p} \quad (2-18)$$

und Teil 2:

$$+ \curvearrowright M_2(x) = Q \times (n - x)$$

+ $\curvearrowright M_2(x)$ - Moment im Teil 2 bei x

$$\delta''_2(x) = \frac{Q \times (n - x)}{E \times I_p} \quad (2-19)$$

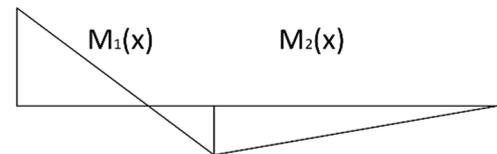


Abbildung 12: Momentenverlauf im T-Stummel
(für Fall 2, dass eine Abstützkraft auftritt)

Unter folgenden Annahmen werden in [6] die Anteile an der Endverformung des elastischen T-Stummels als Funktion von x aus den Teilen 1 und 2 (vgl. Abbildung 11) durch Integration hergeleitet:

Annahmen:

- der T-Stummel verdreht sich aus Symmetrie am Nahtansatzpunkt nicht $\delta_1'(x=-m) = 0$
- der Plattenrand ist in Kontakt mit der Platte $\delta_2(x=n) = 0$
- an der Schnittstelle von 1 und 2 ist die Verformung gleich groß $\delta_1(x=0) = \delta_2(x=0)$
- an der Schnittstelle von 1 und 2 ist für den elastischen Ansatz die Verdrehung gleich groß $\delta_1'(x=0) = \delta_2'(x=0)$

$$\delta_1 = \frac{F}{2 \times E \times I_p} \times \left[\frac{x^3}{3} - \frac{n \times \kappa}{2} \times (x^2 - 2 \times m \times x) - \frac{m^2 \times x}{2} + \frac{L_b \times I_p}{A_s} \times (1 - \kappa) \right] \quad (2-20)$$

$$\delta_2 = \frac{F}{2 \times E \times I_p} \times \left[\frac{\kappa \times x^3}{3} - \frac{n \times \kappa}{2} \times (x^2 - 2 \times m \times x) - \frac{m^2 \times x}{2} + \frac{L_b \times I_p}{A_s} \times (1 - \kappa) \right]$$

(2-21)

L_b - Schraubendehnlänge

A_s - Schraubenschaftdurchmesser

$$\kappa = \frac{3}{2} \times \frac{2 \times L_b \times I_p - m^2 \times n \times A_s}{n^3 \times A_s + 3 \times m \times n^2 \times A_s + 3 \times L_b \times I_p} \quad (2-22)$$

κ - Steifigkeitsverhältnis von Platte und Schraube

In [6] wird die Abstützkraft Q über dieses Steifigkeitsverhältnis aus den oben genannten Gleichungen ermittelt:

$$Q = \frac{F}{2} \times \kappa = \frac{F}{2} \times \frac{3}{2} \times \frac{2 \times L_b \times I_p - m^2 \times e \times A_s}{e^3 \times A_s + 3 \times m \times e^2 \times A_s + 3 \times L_b \times I_p} \quad (2-23)$$

Der Grenzzustand zwischen auftretender und nicht auftretender Abstützkraft Q tritt für $Q=0$ ein:

$$\text{für } Q=0 \text{ muss gelten: } 2 \times L_b \times I_p = m^2 \times e \times A_s$$

$$\text{sodass: } L_{b,\text{lim}} = \frac{m^2 \times e \times A_s}{2 \times I_p} \quad (2-24)$$

$L_{b,\text{lim}}$ - Grenzschaubendehnlänge

$$\text{mit } I_p = \frac{l_{\text{eff},\text{ini}} \times t_p^3}{12} \quad (2-25)$$

$l_{\text{eff},\text{ini}}$ - effektive Anfangsfließlinienlänge

und $e = 1,25 \times m$

$$L_{b,\text{lim}} = \frac{7,5 \times m^3 \times A_s}{l_{\text{eff},\text{ini}} \times t_p^3} \quad (2-26)$$

$l_{\text{eff},\text{ini}} = 0,85 \times l_{\text{eff}}$ wird für das elastische Tragverhalten des T-Stummels angenähert (geschraubter Anschluss / assemblage par plat d'about) [7, p. 3.80]

l_{eff} - effektive Fließlinienlänge für plastisches Verhalten

$$\text{sodass: } L_{b,\text{lim}} = \frac{8,82 \times m^3 \times A_s}{l_{\text{eff}} \times t_p^3} \approx \frac{8,8 \times m^3 \times A_s}{l_{\text{eff}} \times t_p^3} = L_b^* \quad (2-27)$$

Damit eine Abstützkraft auftreten kann, darf die Schraubendehnlänge $L_b = x + 2 \times t_p$ (x nach Tabelle 1: Schraubenparameter x) die Grenzschaubendehnlänge L_b^* nicht überschreiten. [6]

2.2.2.3 Komponente 5: Stirnplatte mit Biegebeanspruchung

Die Tragfähigkeit und Versagensform der Stirnplatte lässt sich anhand des oben beschriebenen äquivalenten T-Stummel Modells berechnen. Die Beanspruchbarkeit der Komponente 5 ermittelt sich als maßgebende Beanspruchbarkeit der Versagensmodi des T-Stummelmodells.

falls Abstützkräfte auftreten:

$$F_{t,ep,Rd} = \min(F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}) \quad (2-28)$$

$F_{t,ep,Rd}$ - Zugbeanspruchbarkeit der auf Biegung abtragenden Stirnplatte

oder falls keine Abstützkräfte auftreten:

$$F_{t,ep,Rd} = \min(F_{T,1-2}; F_{T,3,Rd}) \quad (2-29)$$

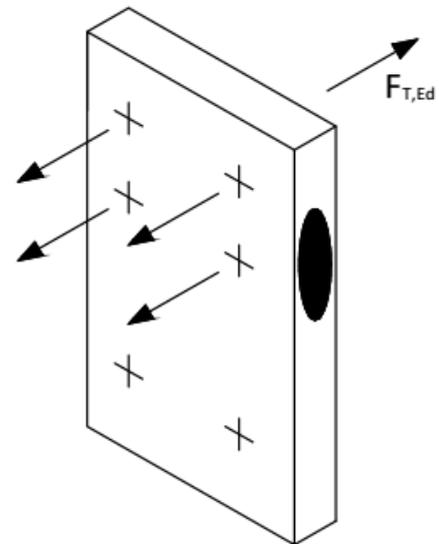


Abbildung 13: Biegebeanspruchung der Stirnplatte

2.2.2.4 Komponente 7: Trägerflansch und -steg mit Druckbeanspruchung

Die Beanspruchbarkeit von Trägerflansch und -steg lässt sich als Teil des Kräftepaars, welches die Biegetragfähigkeit des Trägers beschreibt, ermitteln.

Der Druckwiderstand des Trägerflansches und der angrenzenden Druckzone im Trägersteg ermittelt sich gemäß DIN EN 1993-1-8 [2] nach:

$$F_{c,f,Rd} = \frac{M_{c,y,Rd}}{h - t_f} \quad (2-30)$$

$M_{c,y,Rd}$ - Biegetragfähigkeit des Trägers, soweit erforderlich unter Berücksichtigung der Abminderung aus einer Querkraftinteraktion nach DIN EN 1993-1-1

h - Trägerhöhe

t_f - Flanschdicke des Trägers [2]

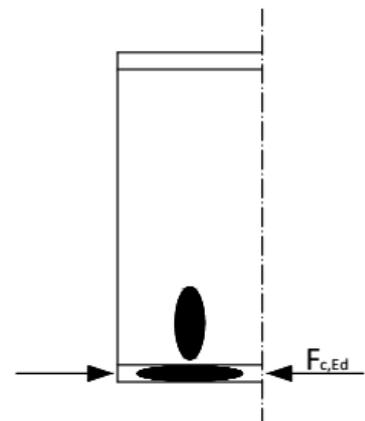
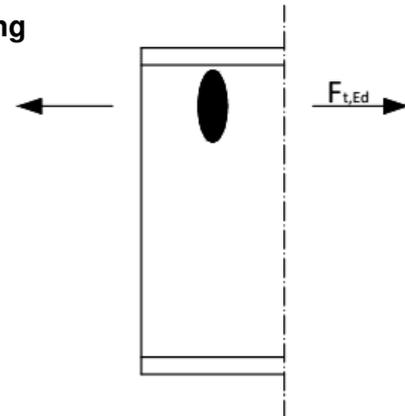


Abbildung 14: Druckbeanspruchung des Trägerflansches

2.2.2.5 Komponente 8: Trägersteg mit Zugbeanspruchung

Das für die Ermittlung der Biegetragfähigkeit der Stirnplatte (Komponente 5) gebildete äquivalente T-Stummel Modell beansprucht den Trägersteg auf Zug. Die Beanspruchbarkeit des Trägersteges auf Zug lässt sich analog zu Komponente 5 für jede Schraubenreihe einzeln sowie für mehrere Schraubenreihen zusammen als Schraubenreihengruppe ermitteln.



$$F_{t,w,Rd} = b_{eff,t,w} \times t_w \times \frac{f_{y,w}}{\gamma_{M0}} \quad (2-31) \quad \text{Abbildung 15: Zugbeanspruchung des Trägersteges}$$

- $b_{eff,t,w}$ - mitwirkende Breite des auf Zug beanspruchten Steges (vgl. Seite 43)
- t_{wb} - Stegdicke des Trägers
- $f_{y,wb}$ - Streckgrenze des Trägersteges
- γ_{M0} - Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchbarkeit von Querschnitten (gemäß DIN EN 1993-1-1/NA) = 1,0

Die mitwirkende Stegbreite entspricht laut DIN EN 1993-1-8 [2] der zugehörigen äquivalenten Fließlinienlänge der jeweiligen Schraubenreihen / -gruppen.

2.2.2.6 Komponente 10: Schrauben mit Zugbeanspruchung

Mit der Einführung der DIN EN 1993-1-8 wurde erstmals neben dem Nachweis der Schraubenzugtragfähigkeit auch der Nachweis gegen ein Durchstanzen der Platte gefordert. Mit auf die Schraubenzugtragfähigkeit abgestimmten Blechdicken wird dieser Nachweis in der Regel jedoch nicht maßgebend.



Abbildung 16: Zugbeanspruchung der Schraube

Die in dieser Arbeit behandelten Stöße liegen mit:

$$t_p \geq 0,5 \times d \quad \text{auf der sicheren Seite} \quad (2-32)$$

t_p - Plattendicke

d - Schaftdurchmesser

In Tabelle 2 wird die Zugbeanspruchbarkeit von allen baupraktischen Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 mit den zugehörigen Durchstanzwiderständen für eine 10 mm starken Platte mit einer Stahlgüte von S235 verglichen.

Über das Verhältnis der erforderlichen Plattendicke und dem Schaftdurchmesser lässt sich feststellen, dass für $t_p \geq 0,5 \times d$ Plattendicken der Durchstanznachweis nicht maßgebend wird.

Zum Beispiel entspricht die Grenzdurchstanzkraft einer 4,9 mm dicken Platte der Grenzzugkraft einer M12 Schraube. Das Verhältnis zwischen dieser „erforderlichen Plattendicke“ und dem Schaftdurchmesser ist für die hier aufgeführten baupraktischen Schrauben stets kleiner als 0,5.

Schraubenbezeichnung = Schaftdurchmesser	$F_{t,Rd}$ [kN]	$B_{p,Rd}$ [kN]	$\frac{F_{t,Rd}}{B_{p,Rd}}$	erforderliche Plattendicke [mm]	Plattendicke Schaftdurchmesser
	10.9	S235 $t_p = 1\text{cm}$			
M 12	60,7	124,6	0,49	4,9	0,41
M 16	113	153,5	0,74	7,4	0,46
M 20	176,4	181,9	0,97	9,7	0,49
M 22	218,2	205,1	1,06	10,6	0,48
M 24	254,2	234	1,09	10,9	0,45
M 27	330,5	262,9	1,26	12,6	0,47
M 30	403,9	286	1,41	14,1	0,47
M 36	588,2	343,2	1,71	17,1	0,48

Tabelle 2: Vergleich von Schraubenzugbeanspruchbarkeit und Durchstanzwiderstand

$F_{t,Rd}$ - Grenzzugkraft einer Schraube nach DIN EN 1993-1-8
(hier für Festigkeitsklasse 10.9)

$B_{p,Rd}$ - Grenzdurchstanzkraft nach DIN EN 1993-1-8
(hier für S235 $t_p = 1\text{ cm}$)

2.2.2.7 Komponente 19: Schweißnähte

Die Dimensionierung der Schweißnähte ermittele ich aus der Beanspruchbarkeit der anderen Komponenten. Um das T-Stummelmodell für die Ermittlung der Biegetragfähigkeit der Stirnplatte anwenden zu können muss die Schweißnahtlänge mindestens der äquivalenten Fließlinienlänge der entsprechenden Schraubenreihe entsprechen.

$$F_{w,Rd} \geq F_{t,ep,Rd} \quad (2-33)$$

$F_{t,ep,Rd}$ - Zugbeanspruchbarkeit der auf Biegung abtragenden Stirnplatte

$F_{w,Rd}$ - Beanspruchbarkeit der Schweißnaht

Die Schweißnaht zwischen Flansch und Stirnplatte bzw. zwischen Steg und Stirnplatte werden bei Momenten- und Zugbeanspruchungen senkrecht zu ihrer Achse beansprucht. Die Mindestschweißnahtdicke der senkrecht zu ihrer Achse belasteten Schweißnähte lässt sich wie folgt herleiten:

$$\sigma_{V,w,Ed} = \sqrt{\sigma_{w,s,Ed}^2 + 3 \times \tau_{w,s,Ed}^2 + 3 \times \tau_{w,p,Ed}^2} \leq \frac{f_u}{\beta_w \times \gamma_{M2}} \quad (2-34)$$

$\sigma_{w,s,Ed}$ - Normalspannung senkrecht zur Schweißnahtachse

$\tau_{w,s,Ed}$ - Schubspannung senkrecht zur Schweißnahtachse

$\tau_{w,p,Ed}$ - Schubspannung parallel zur Schweißnahtachse

f_u - Zugfestigkeit des schwächsten angeschlossenen Teils

β_w - Korrelationsbeiwert (für S235 → $\beta_w=0,8$; für S355 → $\beta_w=0,9$)

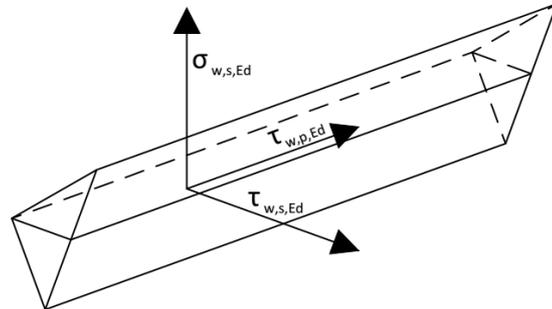


Abbildung 17: berücksichtigte Spannungen in der Kehlnaht

$$\text{für: } \tau_{w,p,Ed} = 0 \quad (2-35)$$

und für senkrecht zu ihrer Achse beanspruchte 90°-Kehlnähte:

$$\sigma_{w,s,Ed} = \tau_{w,s,Ed} = \frac{F_{w,Ed}}{\sqrt{2} \times a \times l_{eff,w}} \quad (2-36)$$

$l_{eff,w}$ - Schweißnahtlänge

$$\sigma_{V,w,Ed} = \frac{\sqrt{2} \times F_{w,Ed}}{a \times l_{eff,w}} \leq \frac{f_u}{\beta_w \times \gamma_{M2}} \quad (2-37)$$

$$a \geq \frac{\beta_w \times \gamma_{M2} \times \sqrt{2} \times F_{w,Ed}}{f_u \times l_{eff,w}} \quad (2-38)$$

zusätzlich einzuhalten ist:

$$\sigma_{w,s,Ed} \leq \frac{0,9 \times f_u}{\gamma_{M2}} \quad (2-39)$$

$$\text{mit 2-36: } a \geq \frac{F_{w,Ed} \times \gamma_{M2}}{\sqrt{2} \times 0,9 \times f_u \times l_{eff,w}} \quad (2-40)$$

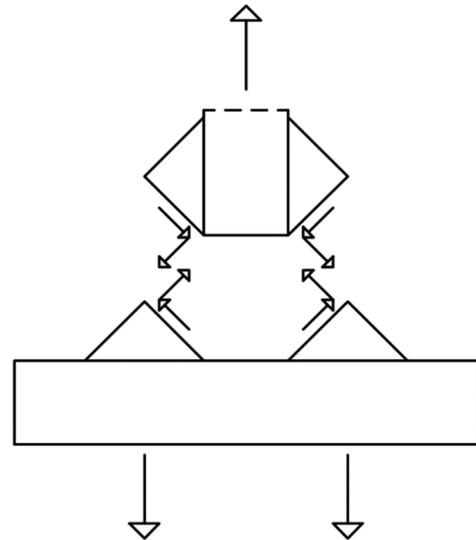


Abbildung 18: senkrecht zur Achse beanspruchte 90° Doppelkehlnaht

Die Gleichung 2-38 ist für beim Stirnplattenstoß übliche Geometrien immer maßgebend. [2]

2.2.3 Beanspruchbarkeit

2.2.3.1 Grenztragfähigkeit in der Trägerkammer

Die maßgebende Zugtragfähigkeit der Schraubenreihe in der Trägerkammer ermittelt sich aus dem Minimum der Tragfähigkeiten der einzelnen Komponenten: [8]

$$F_{tr,Rd} = \min(F_{t,ep,Rd}; F_{t,w,Rd}) \quad \text{gemäß DIN EN 1993-1-8 oder:} \quad (2-41)$$

$$F_{tr,Rd} = F_{t,ep,Rd,a} \quad \text{gemäß Exkurs: gewichteter Lastabtrag (3.8)} \quad (2-42)$$

$F_{tr,Rd}$ - Zugtragfähigkeit einer Schraubenreihe

$F_{t,ep,Rd}$ - Zugbeanspruchbarkeit der auf Biegung abtragenden Stirnplatte (Komp. 5)

$F_{t,w,Rd}$ - Zugtragfähigkeit des Steges (Komponente 8)

$F_{t,ep,Rd,a}$ - angepasste Biegetragfähigkeit der Stirnplatte (Komponente 5/8)

In der Zugbeanspruchbarkeit der auf Biegung abtragenden Stirnplatte $F_{t,ep,Rd}$ ist die Zugtragfähigkeit der Schraube bereits berücksichtigt, sodass diese hier nicht gesondert berücksichtigt werden muss. Die Mindestschweißnahtdicke wurde in 2.2.2.7 aus den Belastungen ermittelt, sodass auch die Schweißnaht hier nicht erneut nachgewiesen werden muss.

2.2.3.2 Grenztragfähigkeit im Stirnplattenüberstand

Für die Zugtragfähigkeit der Schraubenreihe im Stirnplattenüberstand wird nur die Plattenbiegung maßgebend.

$$F_{tr,Rd} = F_{t,ep,Rd} \quad (2-43)$$

Die Beanspruchbarkeiten von Schrauben und Schweißnähten werden analog zu 2.2.3.1 nicht erneut berücksichtigt.

2.2.3.3 Summierte Grenztragfähigkeit

Die summierte Tragfähigkeit der auf Zug beanspruchten Schraubenreihen darf die Tragfähigkeit der auf Druck beanspruchten Komponenten nicht überschreiten, sodass hier gilt:

$$\sum F_{tr,Rd} \leq F_{c,fp,Rd} \quad (2-44)$$

$F_{c,fp,Rd}$ - Drucktragfähigkeit des Trägerflansches (Komponente 7)

Wenn diese Bedingung nicht eingehalten wird, muss die Tragfähigkeit der Schraubenreihe mit dem geringsten Hebelarm bis zum Einhalten dieser Bedingung abgemindert werden.

2.2.3.4 Biegetragfähigkeit

symmetrischer bündiger Stirnplattenstoß

Um die Biegebeanspruchbarkeit des Trägerstoßes zu ermitteln wird zunächst davon ausgegangen, dass die Druckkraft in der Mittelachse des Trägerflansches übertragen wird. Für einen bündigen Stirnplattenstoß verteilt sich die Zugkraft auf die zwei Schraubenreihen. Für den symmetrischen bündigen Stirnplattenstoß ergibt sich die Biegetragfähigkeit zu:

$$M_{j,Rd} = F_{t1,Rd} \times h_1 + F_{t2,Rd} \times h_2 \quad (2-45)$$

$M_{j,Rd}$ - Biegebeanspruchbarkeit des Anschlusses

$F_{t1,Rd}$ - Zugtragfähigkeit der 1. Schraubenreihe (2-41 / 2-42)

h_1 - Hebelarm der 1. Schraubenreihe,

$F_{t2,Rd}$ - Zugtragfähigkeit der 2. Schraubenreihe (2-41 / 2-42)

h_2 - Hebelarm der 2. Schraubenreihe

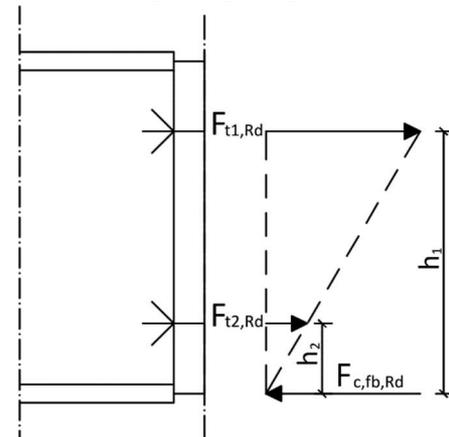


Abbildung 19: Tragverhalten des bündigen Stoßes unter Biegebeanspruchung

Die Hebelarme dieser beiden Schraubenreihen variieren stark, sodass von einer elastischen Schraubenkraftverteilung (vgl. Abbildung 19) ausgegangen wird.

$$F_{t2,Rd} = F_{t1,Rd} \times \frac{h_2}{h_1} \quad (2-46)$$

$$M_{j,el,Rd} = F_{t1,Rd} \times h_1 + \frac{F_{t1,Rd}}{h_1} \times h_2^2 \quad (2-47)$$

Überschreitet die Beanspruchbarkeit der Zugkomponenten die Beanspruchbarkeit der Druckkomponenten ($F_{t1,Rd} + F_{t2,Rd} > F_{c,fp,Rd}$) muss die Beanspruchbarkeit der zweiten Schraubenreihe abgemindert werden

$$F_{t2,Rd} = (F_{c,fp,Rd} - F_{t1,Rd}) \times \frac{h_1}{h_2} \quad (2-48)$$

Wenn bereits die Zugtragfähigkeit der ersten Schraubenreihe die Druckbeanspruchbarkeit des Trägerflansches überschreitet ($F_{t1,Rd} > F_{c,fp,Rd}$) ermittelt sich die Biegetragfähigkeit wie folgt:

$$M_{j,Rd} = F_{c,fp,Rd} \times h_1 \quad (2-49)$$

überstehender Stirnplattenstoß

Beim überstehenden Stirnplattenstoß verteilt sich die Zugbeanspruchung auf zwei Schraubenreihen. Die unterste Schraubenreihe wird für die Ermittlung der Biegetragfähigkeit aufgrund ihres geringen Einflusses vernachlässigt.

elastische Schraubenkraftverteilung

Für den überstehenden Stirnplattenstoß kann auf der sicheren Seite liegend von einer elastischen Schraubenkraftverteilung ausgegangen werden. Die Beanspruchbarkeit ermittelt sich für beide Schraubenreihen einzeln:

$$F_{t1,Rd} = F_{t,ep,Rd} \quad (2-50)$$

$$F_{t2,Rd} = \min(F_{t,ep,Rd}; F_{t,w,Rd}) \quad (2-51)$$

$$\text{oder } F_{t2,Rd} = F_{t,ep,Rd,a} \quad (2-52)$$

Sollte die Summe der Beanspruchbarkeiten der beiden zugbeanspruchten Schraubenreihen die Beanspruchbarkeit des druckbeanspruchten Trägerflansches überschreiten

$$F_{t1,Rd} + F_{t2,Rd} \times \frac{h_2}{h_1} > F_{c,fp,Rd}, \quad (2-53)$$

muss die Tragfähigkeit der in der Trägerkammer liegenden Schraubenreihe soweit abgemindert werden, bis die Bedingung erfüllt ist.

$$F_{t2,Rd} = (F_{c,fp,Rd} - F_{t1,Rd}) \times \frac{h_1}{h_2} \quad (2-54)$$

Die Biegetragfähigkeit des Stoßes ermittelt sich in beiden Fällen zu:

$$M_{j,el,Rd} = F_{t1,Rd} \times h_1 + \frac{F_{t1,Rd}}{h_1} \times h_2^2 \quad (2-55)$$

Analog zum bündigen Stoß muss, wenn die Zugtragfähigkeit der ersten Schraubenreihe die Druckbeanspruchbarkeit des Trägerflansches überschreitet ($F_{t1,Rd} > F_{c,fp,Rd}$), die Biegetragfähigkeit wie folgt ermittelt werden. [4]

$$M_{j,Rd} = F_{c,fp,Rd} \times h_1 \quad (2-56)$$

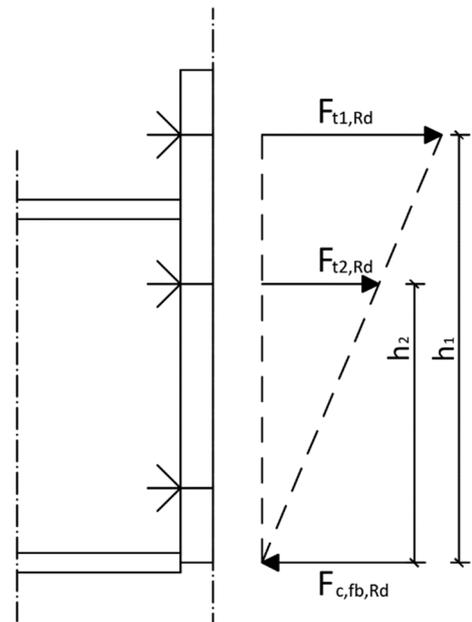


Abbildung 20: elastisches Tragverhalten des überstehenden Stoßes unter Biegebeanspruchung

plastische Schraubenkraftverteilung

Ist für den überstehenden Stirnplattenstoß die Rotationssteifigkeit bekannt, so kann dieser einer von 3 Anschlussklassifizierungen zugeordnet werden.

Anschlüsse, welche der Rotationskapazitätsklasse 1 oder 2 zugeordnet werden können, lassen eine plastische Schnittgrößenumlagerung im System zu. (vgl. Abbildung 21) Bei Anschlüssen der Klasse 3 ist diese Umlagerung nicht möglich, sodass weiterhin von einer elastischen Schraubenkraftverteilung ausgegangen werden muss. [9]

Falls die ausreichende Rotationskapazität für eine Zuordnung in die Klassen 1 oder 2 nachgewiesen werden kann, ermittelt sich die Biegetragfähigkeit des Stoßes zu:

$$M_{j,pl,Rd} = \sum h_r \times F_{tr,Rd} = F_{t1,Rd} \times h_1 + F_{t2,Rd} \times h_2 \quad (2-57)$$

Die Summe der Beanspruchbarkeiten der beiden zugbeanspruchten Schraubenreihen kann die Beanspruchbarkeit des Druckbeanspruchten Trägerflansches nicht überschreiten:

$$F_{t1,Rd} + F_{t2,Rd} \leq F_{c,fp,Rd} \quad (2-58)$$

andernfalls:

$$F_{t2,Rd} = F_{c,fp,Rd} - F_{t1,Rd} \quad (2-59)$$

Überschreitet die Zugbeanspruchbarkeit der ersten Schraubenreihe die Drucktragfähigkeit des Flansches ($F_{t1,Rd} > F_{c,fp,Rd}$) beträgt die Biegetragfähigkeit: [10, p. 15]

$$M_{j,Rd} = F_{c,fp,Rd} \times h_1 \quad (2-60)$$

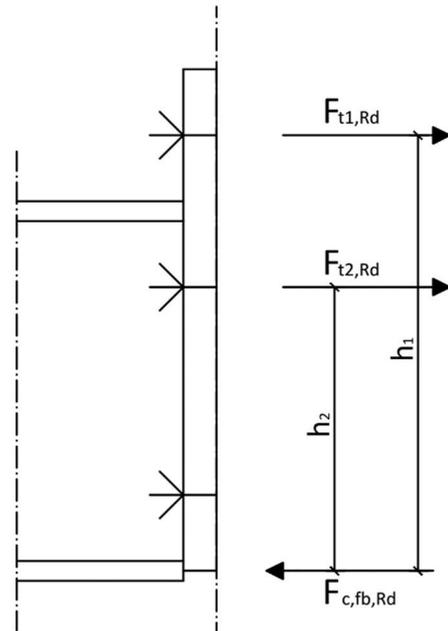


Abbildung 21: plastisches Tragverhalten des überstehenden Stoßes unter Biegebeanspruchung

2.2.3.5 Exkurs: Rotationskapazität des zweireihigen Stoßes

Mit dem Ziel das Verformungsverhalten von Anschlüssen in der Tragwerksplanung berücksichtigen zu können wurde in der DIN EN 1993-1-8 eine Klassifizierung von Anschlüssen entsprechend ihrer Anfangsrotationssteifigkeit vorgenommen. Es wird zwischen einem

- starr-plastischen (starr / Klasse 1)
- elastisch-plastischen (verformbar / Klasse 2)
- elastischen (gelenkig / Klasse 3)

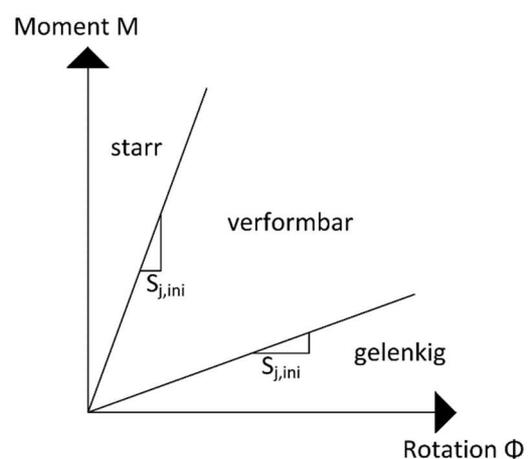


Abbildung 22: Klassifizierung von Anschlüssen nach ihrer Steifigkeit [4]

Bereich unterschieden. (vgl. Abbildung 22)

Damit der Stoß einer Rotationskapazitätsklasse zugeordnet werden kann muss dessen Anfangsrotationssteifigkeit $S_{j,ini}$ ermittelt werden. Für den biegesteifen überstehenden Stirnplattenstoß mit zwei gezogenen Schraubenreihen zählen zu den Einflussgrößen die Schrauben auf Zug und die beiden Stirnplatten auf Biegung [2, p. 6.3.3.1 (5)].

Die Steifigkeitskoeffizienten für den zweireihigen Stoß ermitteln sich nach DIN EN 1993-1-8 [2] wie folgt:

Schrauben einer Reihe auf Zug

$$k_{10} = 1,6 \times \frac{A_s}{L_b} \quad (2-61)$$

k_{10} - Steifigkeitskoeffizient 10 nach DIN EN 1993-1-8

A_s - Schaftdurchmesser der Schraube

L_b - Schraubendehnlänge

Stirnplatte auf Biegung

$$k_5 = \frac{0,9 \times l_{eff} \times t_p^3}{m^3} \quad (2-62)$$

k_5 - Steifigkeitskoeffizient 5 nach DIN EN 1993-1-8

l_{eff} - zugehörige äquivalente Fließlinienlänge

t_p - Plattendicke

m - Abstand der Schraube zum Nahtansatzpunkt (vgl. Abbildung 4)

Die Wegfeder einer Schraubenreihe ergibt sich aus den in Reihe geschalteten Grundkomponenten.

$$k_{eff,r} = \frac{1}{\frac{1}{k_{10}} + \frac{1}{k_5} + \frac{1}{k_5}} \quad (2-63)$$

$k_{eff,r}$ - effektiver Steifigkeitskoeffizient der Schraubenreihe r

Unter der Annahme das die Verformungen in jeder Achse sich proportional zu ihrem Abstand zum Druckpunkt verhalten, lassen sich die Federsteifigkeiten zu einer äquivalenten Federsteifigkeit mit einem äquivalenten Hebelarm zusammenfassen.

$$z_{eq} = \frac{k_{eff,1} \times h_1^2 + k_{eff,2} \times h_2^2}{k_{eff,1} \times h_1 + k_{eff,2} \times h_2} \quad (2-64)$$

z_{eq} - äquivalenter Hebelarm

$$k_{eq} = \frac{k_{eff,1} \times h_1 + k_{eff,2} \times h_2}{z_{eq}} \quad (2-65)$$

k_{eq} - äquivalenter Steifigkeitskoeffizient

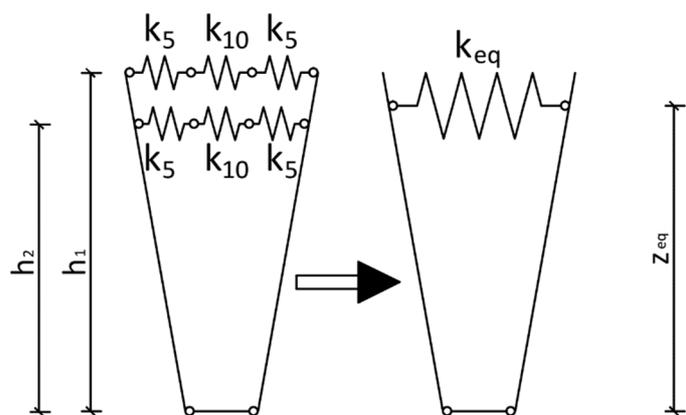


Abbildung 23: äquivalente Federsteifigkeit und äquivalenter Hebelarm

Anfangsrotationssteifigkeit

Die Anfangsrotationssteifigkeit ergibt sich dann wie folgt:

$$S_{j,ini} = E \times z_{eq}^2 \times k_{eq} \quad (2-66)$$

$S_{j,ini}$ - Anfangsrotationssteifigkeit

E - Elastizitätsmodul

Ein Stirnplattenstoß wird den drei Klassen wie folgt zugeordnet:

$$S_{j,ini} \geq 8 \times \frac{E \times I_B}{L_B} \quad \rightarrow \text{Klasse 1 – starr} \quad (2-67)$$

$$0,5 \times \frac{E \times I_B}{L_B} < S_{j,ini} < 8 \times \frac{E \times I_B}{L_B} \quad \rightarrow \text{Klasse 2 – verformbar} \quad (2-68)$$

$$S_{j,ini} \leq 0,5 \times \frac{E \times I_B}{L_B} \quad \rightarrow \text{Klasse 3 – gelenkig} \quad (2-69)$$

I_B - Trägheitsmoment der verbundenen Träger

L_B - Spannweite der verbundenen Träger [10] [11] [12]

2.2.3.6 Exkurs: Vereinfachtes Verfahren nach DIN EN 1993-1-8

Für den in der DIN EN 1993-1-8 betrachteten Stoß wird gefordert, dass die Randbedingung

$$F_{Rd} \leq 3,8 \times F_{t,Rd} \quad (2-70)$$

eingehalten wird um ein Sprödbbruchversagen zu verhindern.

$F_{t,Rd}$ - Zugtragfähigkeit einer einzelnen Schraube

Bleibt der Lastabtrag der zweiten Schraubenreihe zum Steg unberücksichtigt (siehe Abbildung 24) lässt sich vereinfacht die Biegebeanspruchbarkeit des Stoßes wie folgt ermitteln:

$$M_{j,Rd} = F_{Rd} \times z \quad (2-71)$$

z - Hebelarm

$$\text{mit } F_{Rd} = \min(F_{t1,Rd} + F_{t2,Rd}; F_{c,fb,Rd}) \quad (2-72)$$

$$\text{und } z = h - t_f \quad (2-73)$$

h - Trägerhöhe

t_f - Flanschdicke

Es ist zu beachten, dass dieses Ersatzmodell nur für ähnliche m_2 und m_x Gültigkeit besitzt. [2]

m_2 - Abstand der Schraube in der Trägerkammer zum Ansatzpunkt der Flanschnaht

m_x - Abstand der Schraube im Plattenüberstand zum Ansatzpunkt der Flanschnaht

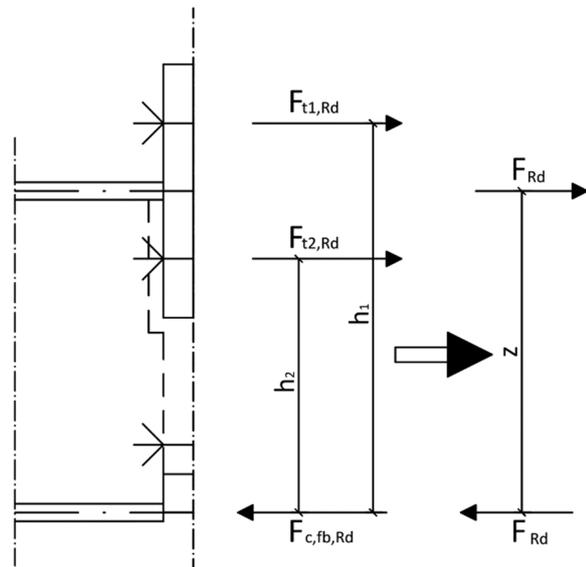


Abbildung 24: Vereinfachtes Berechnungsmodell bei überstehenden Stirnplattenstoßen

2.2.3.7 Normalkrafttragfähigkeit

Zugtragfähigkeit

Die Zugkrafttragfähigkeit eines symmetrischen Stirnplattenstoßes wird analog zur Biegetragfähigkeit ermittelt. Die im Abschnitt 2.2.2 ermittelten Komponenten:

- 5 Stirnplatte auf Biegebeanspruchung (Abschnitt 2.2.2.3)
- 8 Trägersteg mit Zugbeanspruchung (Abschnitt 2.2.2.5)
- 19 Schweißnähte (Abschnitt 2.2.2.7)

können aus der Biegetragfähigkeitsermittlung übernommen bzw. nach den beschriebenen Verfahren ermittelt werden.

Die Zugkrafttragfähigkeit ermittelt sich für den bündigen Stoß nach:

$$N_{j,t,Rd} = F_{t1,Rd} + F_{t2,Rd} \quad \text{mit } F_{t1,Rd} = F_{t2,Rd} \rightarrow N_{j,t,Rd} = 2 \times F_{t1,Rd} \quad (2-74)$$

$N_{j,t,Rd}$ - Zugtragfähigkeit des Stoßes

Für den einseitig überstehenden Stoß muss die halbe Zugbeanspruchung des Stoßes von der unteren Schraubenreihe aufgenommen werden. Vereinfacht ermittelt sich die Gesamtzugtragfähigkeit zu:

$$N_{j,t,Rd} = 2 \times F_{t3,Rd} \quad (2-75)$$

Die Tragfähigkeit des auf beiden Seiten symmetrischen überstehenden Stoßes ermittelt sich nach:

$$N_{j,t,Rd} = F_{t1,Rd} + F_{t2,Rd} + F_{t3,Rd} + F_{t4,Rd} \quad \text{mit } F_{t1,Rd} = F_{t4,Rd} \quad \text{und} \quad F_{t2,Rd} = F_{t3,Rd}$$

$$\rightarrow N_{j,t,Rd} = 2 \times F_{t1,Rd} + 2 \times F_{t2,Rd} \quad (2-76)$$

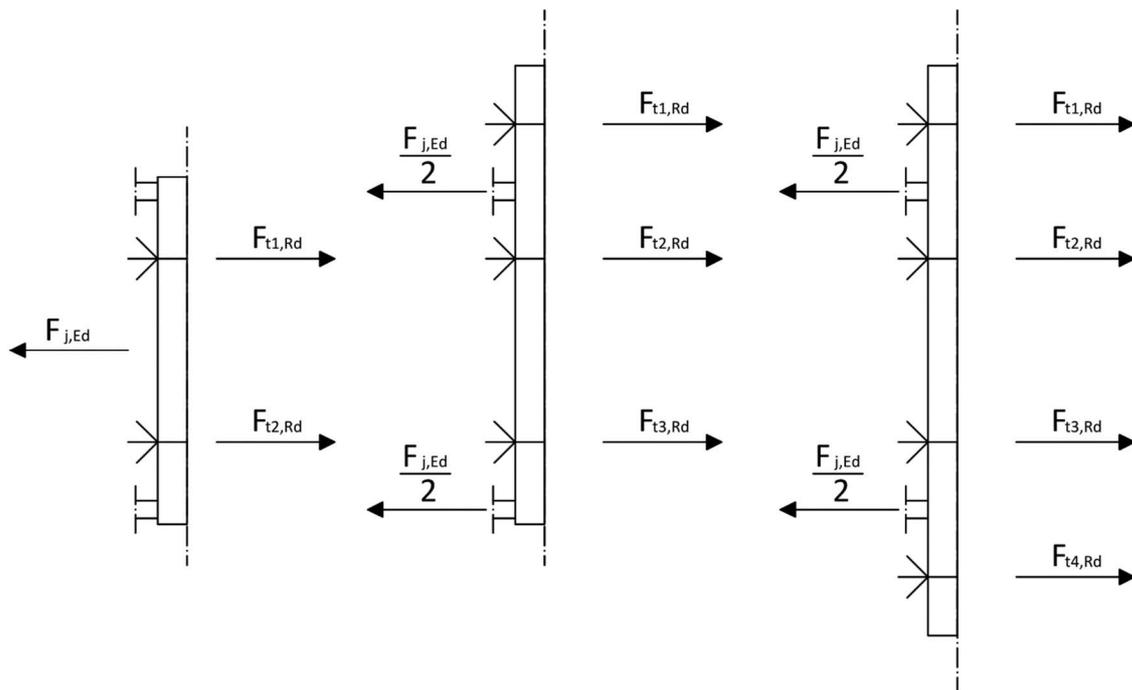


Abbildung 25: Ermittlung der Zugtragfähigkeit für den bündigen, einseitig überstehenden und zweiseitig überstehenden Stoß

Drucktragfähigkeit

Die Drucktragfähigkeit eines Stirnplattenstoßes, welcher zwei gleiche Träger auf ihrer ganzen Querschnittfläche über zwei Stirnplatten verbindet, entspricht bei gleicher Materialgüte von Platte und Trägern der Normalkraftbeanspruchbarkeit der beiden Träger.

$$N_{j,c,Rd} = N_{pl,Rd} \quad (2-77)$$

$N_{j,c,Rd}$ - Drucktragfähigkeit des Stoßes

$N_{pl,Rd}$ - Normalkraftbeanspruchbarkeit der beiden Träger

2.2.3.8 Interaktionsnachweis Normalkraft mit Biegung

Treten in einem Anschluss Normalkräfte und Biegemomente auf, muss geprüft werden, ob ein Interaktionsnachweis geführt werden muss. Ein Interaktionsnachweis entfällt nach DIN EN 1993-1-8 6.2.7.1 (2) [2] wenn:

$$\max\left(\left|\frac{N_{j,c,Ed}}{N_{j,c,Rd}}\right|; \left|\frac{N_{j,t,Ed}}{N_{j,t,Rd}}\right|\right) \leq 0,05 \quad (2-78)$$

$N_{j,t,Ed}$ - Zugkraftbeanspruchung des Stoßes

$N_{j,c,Ed}$ - Druckkraftbeanspruchung des Stoßes

Wird ein Interaktionsnachweis gefordert so kann dieser nach DIN EN 1993-1-8 6.2.7.1 (3) [2] auf der sicheren Seite liegend linear erfolgen. Weil in dieser Arbeit die Zug- und Druckbeanspruchbarkeit einzeln ermittelt wurden, lautet der Interaktionsnachweis:

$$\left|\frac{M_{j,Ed}}{M_{j,Rd}}\right| + \max\left(\left|\frac{N_{j,c,Ed}}{N_{j,c,Rd}}\right|; \left|\frac{N_{j,t,Ed}}{N_{j,t,Rd}}\right|\right) \leq 1,0 \quad (2-79)$$

$M_{j,Ed}$ - Biegemomentbeanspruchung des Anschlusses

Vereinfacht wird nicht berücksichtigt ob die Druck- oder Zugkomponenten für die Biegetragfähigkeitsermittlung maßgebend geworden sind. Die gegebenenfalls auftretende Unterschätzung der Tragfähigkeit wird in dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt.

2.2.3.9 Interaktionsnachweis Querkraft mit Normalkraft und Biegung

Für einen auf Biegung, Normalkraft und Querkraft beanspruchten Anschluss muss in der Regel ein Interaktionsnachweis für die verschiedenen Beanspruchungen geführt werden.

Druckbeanspruchbarkeit des Trägerflansches

Die Interaktionsnachweise für auf Biegung, Normalkraft und Querkraft beanspruchte Querschnitte sind in DIN EN 1993-1-1 (6.2.8, 6.2.9 und 6.2.10) geregelt. [13]

Die plastische Querkraftbeanspruchbarkeit des Trägers ermittelt sich zu:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \times \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}} \quad (2-80)$$

$V_{pl,Rd}$ - plastische Querkraftbeanspruchbarkeit

A_v - wirksame Schubfläche des Trägers

f_y - Streckgrenze des Trägers

γ_{M0} - Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchbarkeit von Querschnitten (gemäß DIN EN 1993-1-1/NA) = 1,0

Wenn die Querkraftbeanspruchung des Trägers die Hälfte der plastischen Querkraftbeanspruchbarkeit überschreitet muss die Streckgrenze der schubbeanspruchten Querschnittsteile abgemindert werden:

$$\rho = \left(\frac{2 \times V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2 \leq 1,0 \quad (2-81)$$

ρ - Streckgrenzenkorrekturwert

Für die in dieser Arbeit behandelten I-Querschnitte mit gleichen Flanschen und einachsiger Biegung wird die plastische Biegetragfähigkeit infolge der Querkraftbeanspruchung nach DIN EN 1993-1-1 (6-30) wie folgt ermittelt:

$$M_{y,V,Rd} = \frac{\left[W_{pl,y} - \frac{\rho \times A_w^2}{4 \times t_w} \right] \times f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{jedoch } M_{y,V,Rd} \leq M_{y,c,Rd} \quad (2-82)$$

$M_{y,V,Rd}$ - Biegetragfähigkeit infolge Querkraftbeanspruchung

$W_{pl,y}$ - plastisches Widerstandsmoment

A_w - Stegfläche

t_w - Stegbreite

$M_{y,c,Rd}$ - Biegebeanspruchbarkeit des Querschnitts
(= $M_{pl,y,Rd}$ für Querschnitte der Klasse 1 oder 2)

Die Abminderung der Druckbeanspruchbarkeit des Trägerflansches erfolgt gemäß 2.2.2.4.

$$F_{c,f,Rd} = \frac{M_{y,V,Rd}}{h - t_f} \quad (2-83)$$

Zugbeanspruchbarkeit des Trägerstegs

Der Streckgrenzenkorrekturwert kann auch auf die Zugtragfähigkeit des Steges angewendet werden, sodass sich diese für eine Querkraftinteraktion analog zu 2.2.2.5 wie folgt ermittelt:

$$F_{t,w,Rd} = b_{eff,t,w} \times t_w \times \frac{(1 - \rho) \times f_{y,w}}{\gamma_{M0}} \quad (2-84)$$

Schrauben

Die Querkraftbeanspruchung des Trägerstoßes wird vereinfacht auf alle Schrauben gleichermaßen aufgeteilt, sodass jede einzelne Schraube mit

$$F_{v,Ed} = \frac{V_{Ed}}{n} \quad (2-85)$$

beansprucht wird.

$F_{v,Ed}$ - Abscherbeanspruchung einer Schraube

V_{Ed} - Querkraftbeanspruchung des Stoßes

n - Anzahl der Schrauben

Die Zugbeanspruchbarkeit der Schrauben muss gemäß DIN EN 1993-1-8 6.2.2 (2) [2] nicht abgemindert werden, wenn die Abscherbeanspruchung das $(0,4 \div 1,4 = 0,29)$ -fache der Abschertragfähigkeit nicht überschreitet.

Gemäß DIN EN 1993-1-8 [2] lautet der Interaktionsnachweis für Abscher- und Zugbeanspruchte Schrauben:

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \times F_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (2-86)$$

$F_{v,Rd}$ - Abscherbeanspruchbarkeit einer Schraube

$F_{t,Ed}$ - Zugbeanspruchung einer Schraube

$F_{t,Rd}$ - Zugbeanspruchbarkeit einer Schraube

Überschreitet die Abscherbeanspruchung das $(0,4 \div 1,4 = 0,29)$ -fache der Abschertragfähigkeit lässt sich die Zugbeanspruchbarkeit wie folgt ermitteln:

$$F_{t,Ed} \leq \left(1,0 - \frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} \right) \times 1,4 \times F_{t,Rd} \quad (2-87)$$

oder:

$$F_{t,Rd} = \min \left(\left(1,0 - \frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} \right) \times 1,4 \times F_{t,Rd}; F_{t,Rd} \right) \quad (2-88)$$

Stegschweißnahtbeanspruchbarkeit

In 3.9 wird die Mindestschweißnahtdicke für einen auf Biegung und Normalkraft beanspruchten Stirnplattenstoß ermittelt. Bei einer Querkraftbeanspruchung ist zusätzlich die Interaktion zwischen den Normal- und Schubspannungen in der Schweißnaht zu prüfen.

Damit die Schweißnaht nicht die maßgebende Komponenten des Anschlusses darstellt muss die Beanspruchbarkeit senkrecht zu ihrer Achse mindestens $F_{w,s,Rd}$ betragen. (vgl. 3.9)

Die Normalspannung und Schubspannung senkrecht zur Schweißnahtachse betragen analog zu 2.2.2.7:

$$\sigma_{w,s,Ed} = \tau_{w,s,Ed} = \frac{F_{w,s,Rd}}{\sqrt{2} \times a \times l_{eff,w}} \quad (2-89)$$

$F_{w,s,Rd}$ - Mindestbeanspruchbarkeit der Stegchweißnaht senkrecht zu ihrer Achse

Parallel zu ihrer Achse wird die Stegchweißnaht durch die Querkraft auf Schub mit

$F_{w,p,Ed} = V_{Ed}$ beansprucht.

$F_{w,p,Ed}$ - Beanspruchung der Stegchweißnaht parallel zu ihrer Achse

Die Schubspannung parallel zu Schweißnahtachse beträgt:

$$\tau_p = \frac{F_{w,p,Ed}}{A_w} \quad (2-90)$$

τ_p - Schubspannung parallel zur Schweißnahtachse

A_w - wirksame Kehlnahtfläche

$$A_w = a \times l_{eff} \quad (2-91)$$

a - Schweißnahtdicke

l_{eff} - effektive Schweißnahtlänge

$$l_{eff} = 2 \times (h - 2 \times t_f) \quad (2-92)$$

h - Trägerhöhe

t_f - Trägerflanschdicke

Analog zu 2.2.2.7 gilt die Schweißnaht als tragfähig wenn folgende Bedingungen eingehalten werden:

$$\sigma_{V,w,Ed} = \sqrt{\sigma_{w,s,Ed}^2 + 3 \times \tau_{w,s,Ed}^2 + 3 \times \tau_{w,p,Ed}^2} \leq \frac{f_u}{\beta_w \times \gamma_{M2}} \quad (2-93)$$

$$\sigma_{w,s,Ed} \leq \frac{0,9 \times f_u}{\gamma_{M2}} \quad (2-94)$$

Sollte der Nachweis nicht erfüllt sein muss die Schweißnahtdicke erhöht werden.

3 Fließlinien

3.1 Grundformen

Die sich im T-Stummel-Modell ausbildenden Fließmuster lassen sich in kreisförmige und nicht kreisförmige Muster unterteilen.

Individuelles Kreismuster

Das sich kreisförmig um eine einzelne Schraube ausbildende kreisförmige Fließmuster wird als Fließkegel bezeichnet. Die wirksame Länge als Umfang des Fließkegels ermittelt sich wie folgt:

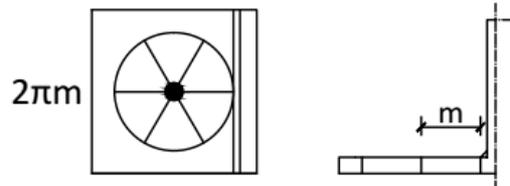


Abbildung 26: individuelles Fließlinienmuster

$$l_{eff,cp} = 2 \times \pi \times m \quad (3-1)$$

$l_{eff,cp}$ - wirksame Länge des kreisförmigen Fließmusters

Individuelles nicht kreisförmiges Muster

Ein nicht kreisförmiges Muster bildet sich bei einem geringen Abstand zwischen Schraube und Plattenrand aus. Die wirksame Länge der Fließlinie beträgt:

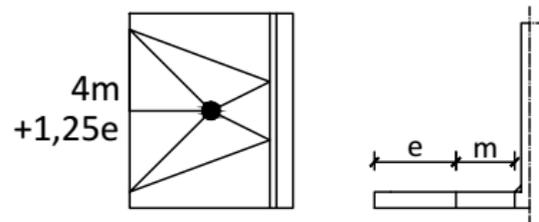


Abbildung 27: individuelles nicht kreisförmiges Fließlinienmuster

$$l_{eff,nc} = 4 \times m + 1,25 \times e \quad (3-2)$$

e - Randabstand

3.2 Exkurs: Herleitung des nicht kreisförmigen Fließlinienmusters

Anders als das kreisförmige Fließlinienmuster lässt sich das nicht kreisförmige Muster nicht über die geometrische Länge der Fließlinie herleiten. Wie in Abbildung 28 zu erkennen ist, teilen die Fließlinien die Verformungsfigur in mehrere ebene Dreiecksflächen auf. Zoetemeijer leitet in seiner Untersuchung [14] die effektive Fließlinienlänge für das nicht kreisförmige Muster bei einer Schraubengruppe her.

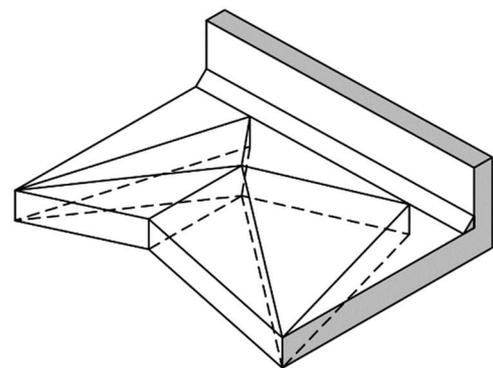


Abbildung 28: dreidimensionale Darstellung des nicht kreisförmigen Fließlinienmusters

In Anlehnung an die Herleitung der Fließlinienlänge eines nicht kreisförmigen Gruppenmusters, leite ich die nicht kreisförmige Fließlinienlänge für eine einzelne Schraube wie folgt her:

Die äußere Arbeit als Produkt der die Strecke σ zurücklegenden Kraft F ermittelt sich gemäß dem Ersatzstabmodells des reinen Flanschfließens (Modus 1) zu:

$$\sum A_{A,i} = F \times \delta \tag{3-3}$$

- $A_{A,i}$ - äußere Arbeit
- F - Kraft im halben T-Stummel für den Grenzzustand
- δ - Fließgelenkverschiebung δ

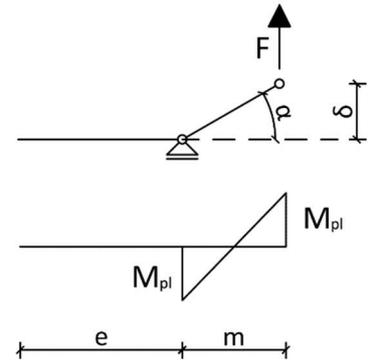


Abbildung 29: Ersatzstabmodell der äußeren Arbeit

Die entlang der einzelnen Fließlinien verrichtete innere Arbeit ermittelt sich als

$$A_{I,i} = m_{pl} \times l_i \times \varphi_i \tag{3-4}$$

- $A_{I,i}$ - innere Arbeit entlang der Fließlinie i
- i - Nummerierung der Fließlinie
- m_{pl} - plastische längenbezogene Biegetragfähigkeit der Stirnplatte
- l_i - Länge der Fließlinie i
- φ_i - Verdrehung der Platte entlang der Fließlinie i (im Bogenmaß)

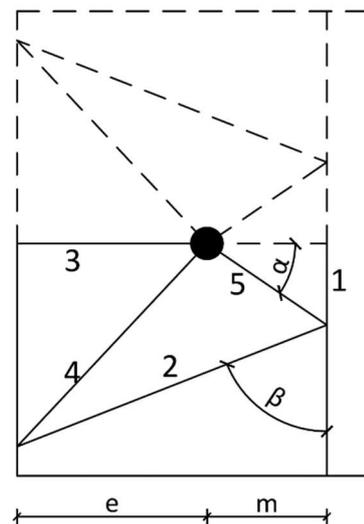


Abbildung 30: geometrische Randbedingungen für das nicht kreisförmige Fließlinienmuster

Durch Anwendung des Prinzips der virtuellen Kräfte sollen die Summen der inneren und äußeren Arbeit gleichgesetzt werden:

$$\sum A_{I,i} = \sum A_{A,i} \tag{3-5}$$

Bevor die innere Arbeit mit der äußeren Arbeit gleichgesetzt werden kann muss die Gleichung der inneren Arbeit so umgeformt werden, dass sich die Summe der inneren Arbeit als Funktion der Fließgelenkverschiebung δ der äußeren Arbeit ergibt.

Die Summe der inneren Arbeit soll aus Symmetriegründen zunächst für das halbe Fließlinienmuster bestimmt werden. Gemäß und in Anlehnung an die Arbeit von Zoetemeijer [14] leitet sich diese wie folgt her:

Fließlinie 1:

$$A_{I,1} = m_{pl} \times l_1 \times \varphi_1$$

$$l_1 = m \times \tan(\alpha)$$

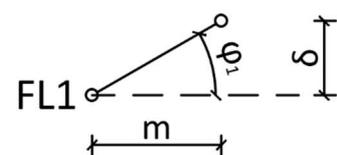


Abbildung 31: Beziehung φ zu δ bei der Fließlinie 1

Fließlinie 4:

$$A_{I,4} = m_{pl} \times l_4 \times \varphi_4$$

$$l_4 = \sqrt{b^2 + e^2}$$

$$\varphi_4 = \varphi_a - \varphi_b$$

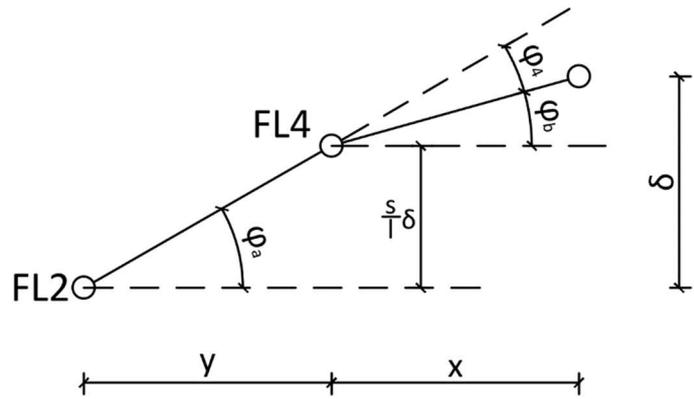


Abbildung 33: geometrische Herleitung von φ_4

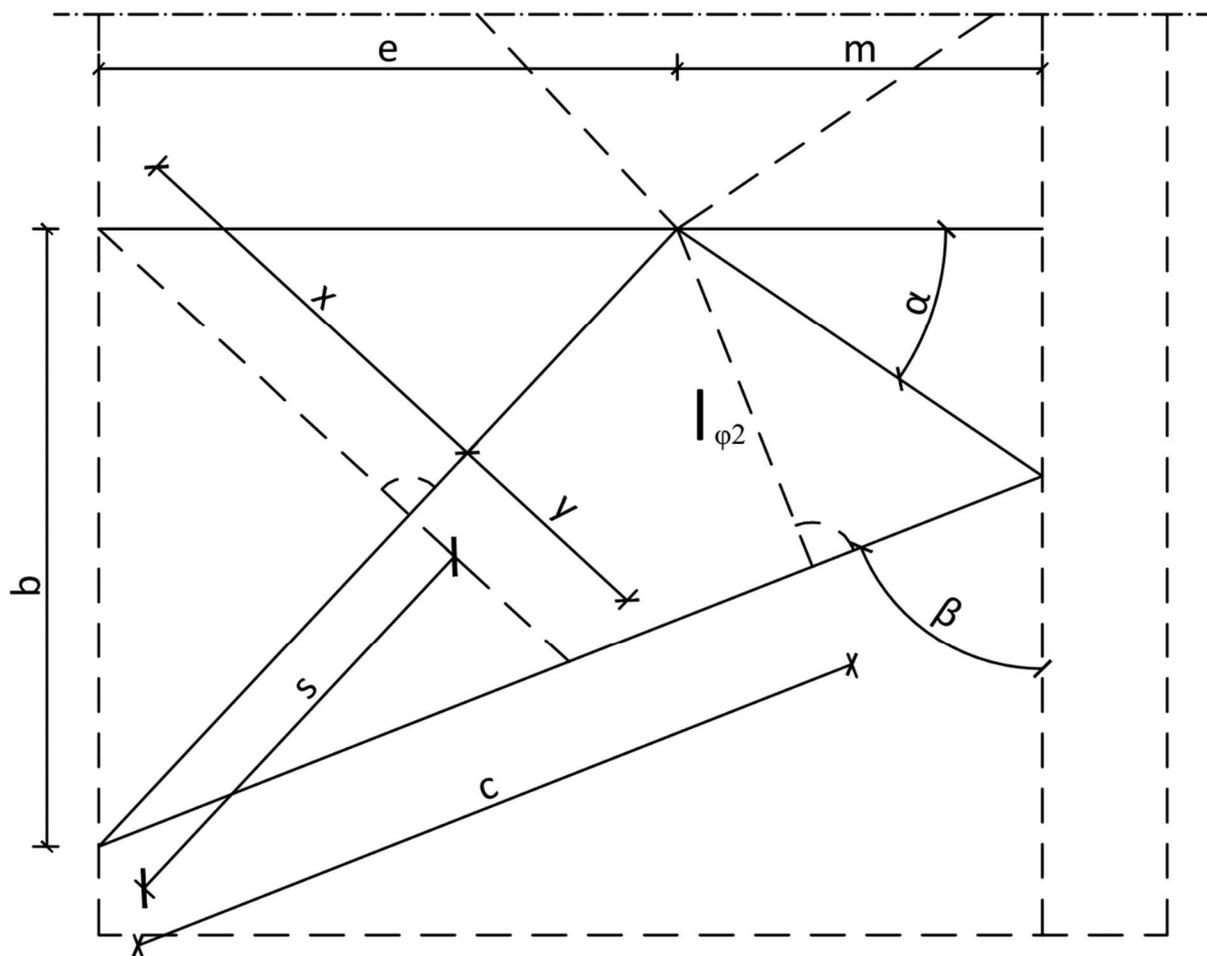


Abbildung 34: geometrische Herleitung der Einflussgrößen für φ_4

$$\varphi_a = \frac{\frac{s}{l} \times \delta}{y}$$

$$\varphi_b = \frac{\delta - \frac{s}{l} \times \delta}{x}$$

$$\text{und } l_5 = \frac{m}{\cos(\alpha)}$$

$$A_{l,4} = m_{pl} \times \delta \times \left(\cot(\beta) + \frac{e}{m} \times \frac{\cos(\alpha)}{\sin(\beta) \times \cos(\beta - \alpha)} - \frac{e}{b} \right) \quad (3-9)$$

Fließlinie 5:

$$A_{l,5} = m_{pl} \times l_5 \times \varphi_5$$

$$l_5 = \frac{m}{\cos(\alpha)}$$

Die Rotation der Fließlinie 5 lässt sich über den Sinussatz aus dem Rotationsdreieck mit den Fließlinien 1 und 2 ermitteln.

$$\frac{\varphi_2}{\sin(90 - \alpha)} = \frac{\varphi_5}{\sin(\beta)}$$

$$\varphi_5 = \frac{\varphi_2 \times \sin(\beta)}{\sin(90 - \alpha)}$$

$$\text{mit } \varphi_2 = \frac{\delta}{\frac{m}{\cos(\alpha)} \times \cos(\beta - \alpha)}$$

$$\text{und } \sin(90 - \alpha) = \cos(\alpha)$$

$$\varphi_5 = \frac{\delta}{m} \times \frac{\sin \beta}{\cos(\beta - \alpha)}$$

$$A_{l,5} = m_{pl} \times \delta \times \frac{\sin \beta}{\cos(\alpha) \times \cos(\beta - \alpha)} \quad (3-10)$$

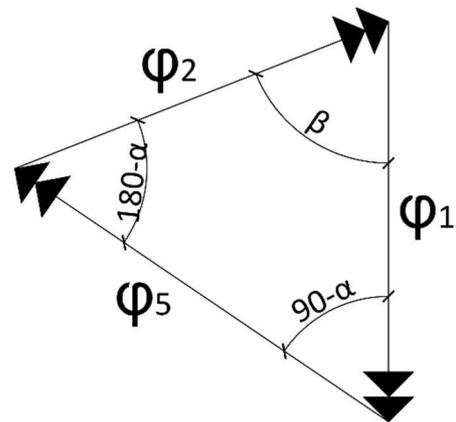


Abbildung 36: Rotationsdreieck zur Herleitung von φ_5 mit dem Sinussatz

Die Summe der inneren Arbeit ergibt sich somit für das nicht kreisförmige Fließlinienmuster einer T-Stummelhälfte wie folgt:

$$\frac{\sum A_{l,i}}{2} = \left(\begin{array}{l} \tan(\alpha) \quad [Anteil aus Fließlinie 1] \\ + \frac{m+e}{\sin(\beta)} \times \frac{\cos(\alpha)}{m \times \cos(\beta-\alpha)} \quad [Anteil aus Fließlinie 2] \\ + \frac{e}{b} \quad [Anteil aus Fließlinie 3] \\ \cot(\beta) \\ + \frac{e}{m} \times \frac{\cos(\alpha)}{\sin(\beta) \times \cos(\beta-\alpha)} \quad [Anteil aus Fließlinie 4] \\ - \frac{e}{b} \\ + \frac{\sin \beta}{\cos(\alpha) \times \cos(\beta-\alpha)} \quad [Anteil aus Fließlinie 5] \end{array} \right) \times \delta \times m_{pl} \quad (3-11)$$

vereinfacht:

$$\sum A_{l,i} = \left(\begin{array}{l} \frac{m+2e}{\sin(\beta)} \times \frac{\cos(\alpha)}{m \times \cos(\beta-\alpha)} \\ + \tan(\alpha) + \cot(\beta) \\ + \frac{\sin \beta}{\cos(\alpha) \times \cos(\beta-\alpha)} \end{array} \right) \times \delta \times m_{pl} \times 2 \quad (3-12)$$

mit Gleichung 3-3

$$F \times \delta = \left(\begin{array}{l} \frac{m+2e}{\sin(\beta)} \times \frac{\cos(\alpha)}{m \times \cos(\beta-\alpha)} \\ + \tan(\alpha) + \cot(\beta) \\ + \frac{\sin \beta}{\cos(\alpha) \times \cos(\beta-\alpha)} \end{array} \right) \times \delta \times m_{pl} \times 2 \quad (3-13)$$

Zur Bestimmung der inneren Arbeit für den Versagensmodus muss die minimale innere Arbeit bestimmt werden.

Die innere Arbeit wird über die Winkel α und β differenziert um die Minima zu finden.

$$\frac{d}{d\alpha} \sum A_{l,i} = 0 \quad \text{und} \quad \frac{d}{d\beta} \sum A_{l,i} = 0$$

Für die Lösung dieser beiden Gleichungen soll hier auf Zoetemeijer [14, pp. 29-31] verwiesen werden. Die minimale innere Arbeit ergibt sich für:

$$\cos(\alpha) = \frac{\sin(\beta)}{\sqrt{\frac{m+e}{m}}} \quad (3-14)$$

$$\cos(\beta) = \frac{1}{2 \times \sqrt{\frac{m+e}{m}}} \quad (3-15)$$

Durch Einsetzen von 3-14 und 3-15 in 3-13 und Umformen ergibt sich nach Zoetemeijer [14]:

$$\frac{6m+8e}{\sqrt{3 \times m^2 + 4 \times e \times m}} \times \delta \times m_{pl} \times 2 = F \times \delta \quad (3-16)$$

$$F = \frac{6m+8e}{\sqrt{3 \times m^2 + 4 \times e \times m}} \times m_{pl} \times 2 \quad (3-17)$$

Zoetemeijer [14] zeigt in seiner Arbeit, dass für alle baupraktischen Geometrien ($m < e < 3m$) der Term

$$\frac{6m+8e}{\sqrt{3 \times m^2 + 4 \times e \times m}}$$

vereinfacht mit $4m + 1,25e$

beschrieben werden kann. (vgl.

Diagramm 1)

Die Tragfähigkeit des ganzen T-Stummels kann somit als

$$F_{T,Rd} = m_{pl} \times 4 \times (4m + 1,25e) \text{ beschrieben werden.} \quad (3-18)$$

3.3 Gruppen

Werden verschiedene Schraubenreihen nicht durch eine Steife oder den Trägerflansch voneinander getrennt, können diese bei geringen Lochabständen auch als Gruppe entlang einer gemeinsamen Fließlinie versagen. Für Schrauben in einer Schraubengruppe ist zusätzlich zur äquivalenten Fließlinienlänge des Einzelmusters die Fließlinienlänge als Teil einer Schraubengruppe zu ermitteln. Für kreisförmige und nicht kreisförmige Muster wird jeweils unterschieden ob sich die Schraube am Beginn oder im inneren einer Schraubengruppe befindet.

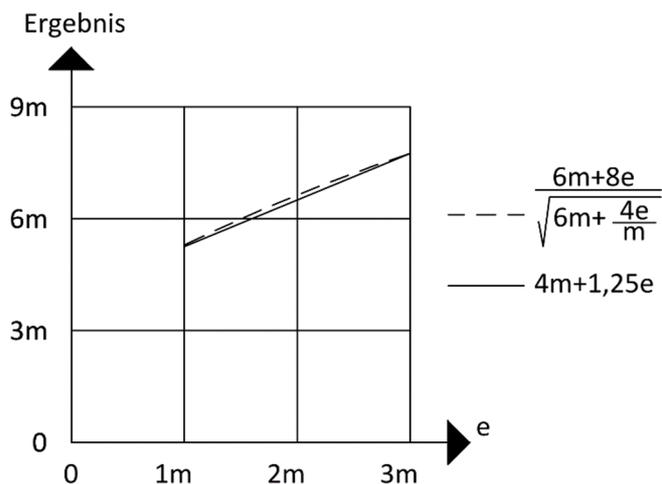


Diagramm 1: Fließlinienlängendiagramm für baupraktische Geometrien

Beginn einer Gruppe

Befindet sich die Schraube am Beginn einer Schraubengruppe setzt sich das Fließmuster jeweils zur Hälfte aus dem Einzel- und dem Gruppenmuster zusammen. Für ein kreisförmiges Muster ergibt sich die äquivalente Länge Fließlinienmusters der Schraube am Beginn einer Gruppe zu:

$$l_{eff,cp} = \pi \times m + p \tag{3-19}$$

p - Lochabstand

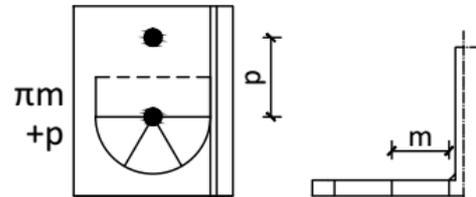


Abbildung 37: kreisförmiges Fließlinienmuster als Beginn einer Gruppe

Die äquivalente Fließlinienlänge für die Schraube am Beginn einer Gruppe mit nicht kreisförmigen Muster beträgt:

$$l_{eff,nc} = 2 \times m + 0,625 \times e + 0,5p \tag{3-20}$$

Das kreisförmige Fließlinienmuster wird für Gruppen in der Regel nur für sehr große Randabstände maßgebend.

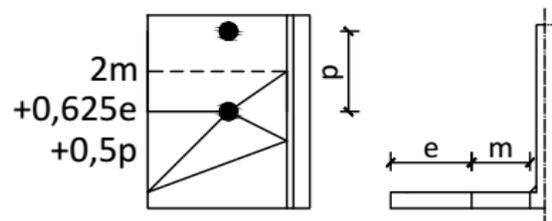


Abbildung 38: nicht kreisförmiges Fließlinienmuster als Beginn einer Gruppe

Innerer Teil einer Gruppe

Befindet sich die Schraube im inneren einer Schraubengruppe mit kreisförmigen Muster entspricht die äquivalente Fließlinienlänge dem doppelten Lochabstand.

$$l_{eff,cp} = 2 \times p \tag{3-21}$$

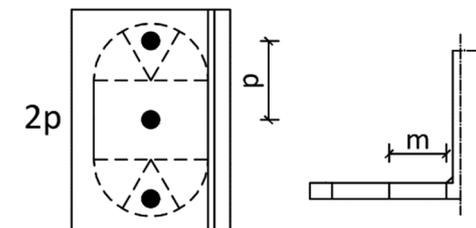


Abbildung 39: Innerer Teil eines kreisförmigen Gruppenmusters

Für die innere Schraube einer Schraubengruppe mit nicht kreisförmigen Muster entspricht die äquivalente Fließlinienlänge dem einfachen Lochabstand.

$$l_{eff,nc} = p \tag{3-22}$$

Die Fließlinienlänge der inneren Schraube einer nicht kreisförmigen Schraubengruppe ist immer kleiner als der Wert für dieselbe Schraube als innerer Teil einer kreisförmigen Schraubengruppe.

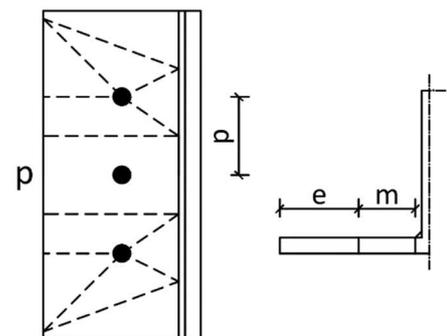


Abbildung 40: innerer Teil eines nicht kreisförmigen Gruppenmusters

Bei sehr großen Randabständen kann sich dennoch das kreisförmige Muster an den beiden Enden der Schraubengruppe ausbilden, sodass sich auch im inneren das zugehörige Muster ausbildet. Dies ist ein Ausnahmefall, welcher baupraktisch nicht beachtet werden soll.

3.4 Steifen

Wenn sich eine Schraubenreihe neben einer Steife befindet, muss für das nicht kreisförmige Muster die Behinderung des Fließmusters berücksichtigt werden.

Für die neben einer Steife liegende Schraube, kann dieser günstige Einfluss mittels eines Alpha-Wertes beschrieben werden.

Die Geometrieverhältnisse beschreibenden Parameter λ_1 und λ_2 ermitteln sich wie folgt:

$$\lambda_1 = \frac{m}{m + e} \tag{3-23}$$

$$\lambda_2 = \frac{m_2}{m + e} \tag{3-24}$$

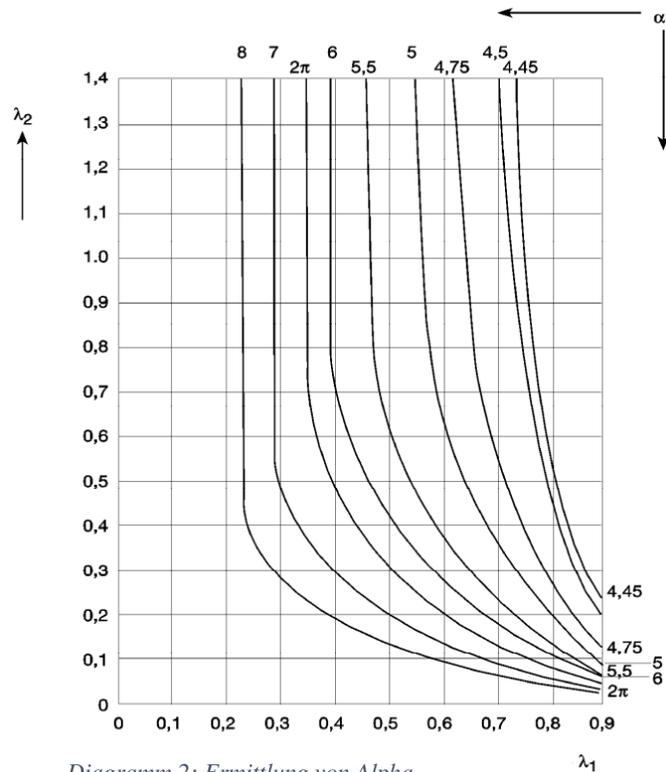


Diagramm 2: Ermittlung von Alpha

Der Alpha-Wert kann dann aus dem Diagramm 2 ausgelesen werden.

Alternativ kann der Alpha-Wert auch iterativ bestimmt werden. [4]

Hierzu wird mit $\alpha_1 = 4,45$ begonnen.

$$\lambda_1^* = \frac{1,25}{\alpha_i - 2,75} \tag{3-25}$$

$$\lambda_2^* = \frac{\alpha_i \times \lambda_1^*}{2} \tag{3-26}$$

1. falls $\lambda_2 < \lambda_2^*$ dann $\lambda_1^{**} = \lambda_1^* + (1 - \lambda_1^*) \times \left(\frac{\lambda_2^* - \lambda_2}{\lambda_2^*} \right)^{\frac{\alpha}{\sqrt{2}}}$ weiter mit 2. (3-27)

sonst $\lambda_1^{**} = \lambda_1^*$ weiter mit 2. (3-28)

2. falls $\lambda_1 \leq \lambda_1^{**}$ dann $\alpha_{i+1} = \alpha_i + 0,01$ mit neuem $\alpha \rightarrow$ zurück zu (3-25) (3-29)

sonst weiter mit (3-30)

Die äquivalente Länge des nicht kreisförmigen sich neben einer Steife ausbildenden Fließmusters für eine einzelne Schraubenreihe beträgt:

$$l_{eff,nc} = \alpha \times m \tag{3-30}$$

Einseitig durch die Steife begrenzt, kann sich die Schraubenreihe auch am Beginn einer Schraubengruppe befinden. Die Länge der äquivalenten Fließlinie ergibt sich zu:

$$l_{eff,nc} = 0,5 \times p + \alpha \times m - (2 \times m + 0,625 \times e) \tag{3-31}$$

3.5 Plattenrand

Bei überstehenden Stirnplattenstößen können für die außerhalb der Trägerkammer liegenden Schraubenreihen weitere Fließmuster maßgebend werden.

Die äquivalente Länge des individuellen kreisförmigen sich am Rand ausbildende Musters wird wie folgt ermittelt:

$$l_{eff,cp} = \pi \times m + 2 \times e_x \tag{3-32}$$

Das entsprechende nicht kreisförmige Muster berechnet sich nach:

$$l_{eff,nc} = 2 \times m + 0,625 \times e + e_x \tag{3-33}$$

Für die einzelne Schraubenreihe, welche beim zweireihigen Stirnplattenstoß außerhalb der Trägerflansche liegt, kann auch die Platte über ihre volle Breite versagen, sodass sich die äquivalente Fließlänge für eine Schraube aus der halben Plattenbreite ergibt:

$$l_{eff,nc} = 0,5 \times b_p \tag{3-34}$$

b_p - Breite der Stirnplatte [15] [8]

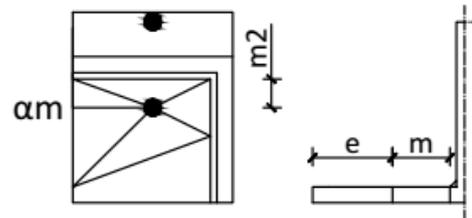


Abbildung 41: einzelnes Fließlinienmuster neben einer Steife

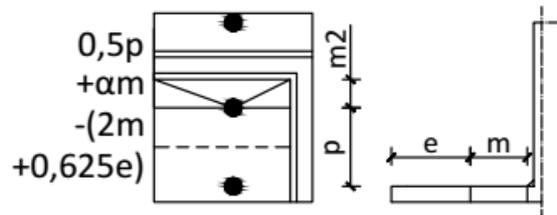


Abbildung 42: Beginn eines Gruppenmusters neben einer Steife

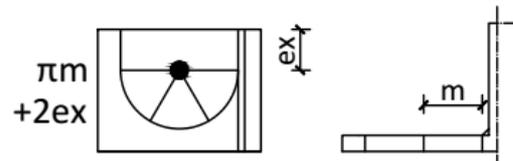


Abbildung 43: kreisförmiges Fließlinienmuster am Plattenrand

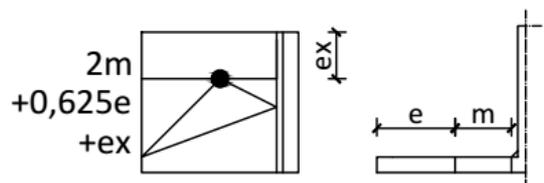


Abbildung 44: nicht kreisförmiges Fließlinienmuster am Plattenrand

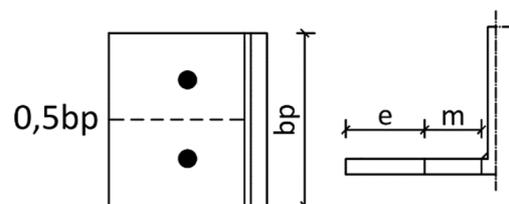


Abbildung 45: Beginn einer Gruppe am Plattenrand (hier speziell Stirnplattenüberstand)

3.6 Fließlinien im Stirnplattenüberstand

Die Schraubenreihe im Stirnplattenüberstand kann zusammen mit der in der Trägerkammer liegenden Schraubenreihe das äquivalente T-Stummel Modell ausbilden. Die in 3.2 beschriebenen Fließlinienmuster, lassen sich nach einer Drehung um 90 Grad auf den überstehenden Teil des Stirnplattenstoßes anwenden, sodass sich für diese Schraubenreihe horizontale Gruppen bilden können und ein Versagen über den rechten und linken Plattenrand berücksichtigt werden muss.

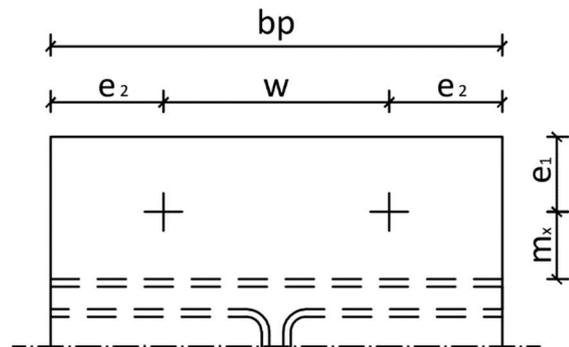


Abbildung 46: Geometriebezeichnung im Stirnplattenüberstand

Die äquivalente Länge des Fließlinienmusters berechnet sich für die zwei Schrauben jeweils nach 3.1, 3.3 und 3.5:

$$\begin{aligned}
 l_{eff,1} &= \min(2 \times \pi \times m_x; 4 \times m_x + 1,25 \times e_1; && \text{Grundform nach 3.1} \\
 &\pi \times m_x + w; 2 \times m_x + 0,625 \times e_1 + 0,5 \times w; && \text{Gruppe nach 3.3} \\
 &\pi \times m_x + 2 \times e_2; 2 \times m_x + 0,625 \times e_1 + e_2; 0,5 \times b_p) && \text{Plattenrand nach 3.5} \quad (3-35)
 \end{aligned}$$

Aufgeteilt in kreisförmige (cp) und nicht kreisförmige (nc) Muster:

$$l_{eff,cp} = \min(2 \times \pi \times m_x; \pi \times m_x + w; \pi \times m_x + 2 \times e_2) \quad (3-36)$$

$$l_{eff,nc} = \min(4 \times m_x + 1,25 \times e_1; 2 \times m_x + 0,625 \times e_1 + 0,5 \times w; 2 \times m_x + 0,625 \times e_1 + w; 0,5 \times b_p) \quad (3-37)$$

3.7 Fließlinien in der Trägerkammer

Für die Schraubenreihe in der Trägerkammer bildet sich ein äquivalenter T-Stummel über den Trägersteg aus. Der Trägerflansch kann als stabilisierende Steife angesetzt werden.

Die äquivalente Länge des Fließlinienmusters berechnet sich für die zwei Schrauben jeweils nach 3.1 und 3.3:

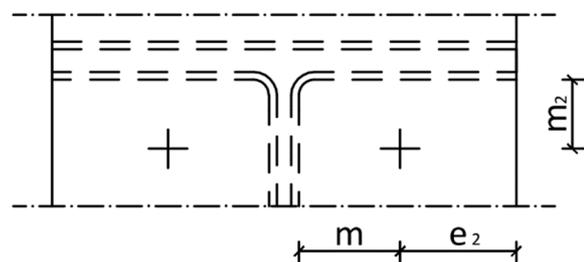


Abbildung 47: Geometriebezeichnung in der Trägerkammer

$$\begin{aligned}
 l_{eff,1} &= \min(2 \times \pi \times m; 4 \times m + 1,25 \times e_2; && \text{Grundform nach 3.1} \\
 &\pi \times m + p; 2 \times m + 0,625 \times e_2 + 0,5 \times p; && \text{Gruppe nach 3.3} \\
 &\alpha \times m; \alpha \times m + 0,5 \times p - (2 \times m + 0,625 \times e_2)) && \text{Steife nach 3.4} \quad (3-38)
 \end{aligned}$$

p - Abstand zwischen den in der Trägerkammer liegenden Schraubenreihen (nur bei Gruppenbetrachtung erforderlich)

Direkt unter dem Trägerflansch können für die in die in dieser Arbeit betrachteten Stirnplattenstöße nur zwei Muster maßgebend sein:

$$l_{eff,nc} = \alpha \times m \quad (3-39)$$

$$l_{eff,cp} = 2 \times \pi \times m \quad (3-40)$$

3.8 Exkurs: Gewichteter Lastabtrag

Björn Schmidt [16] verwendet in seiner Dissertation ein Ersatzstabmodell um die Gewichtung des Lastabtrags in der Trägerkammer zwischen dem Steg, dem inneren Flanschbereich und dem äußeren Flanschbereich ermitteln zu können.

Dieses Ersatzmodell kann auf den 2-reihigen Stoß übertragen werden, (vgl. Abbildung 48) um eine Ermittlung der Beanspruchung des Trägerstegs auf Zug und der zugehörigen Schweißnaht vornehmen zu können.

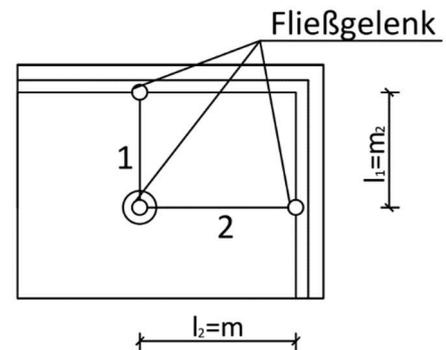


Abbildung 48: Ersatzstabmodell zur Steifigkeitsermittlung beim 2-reihigen Stirnplattenstoß

Die Gewichtung erfolgt proportional zu den Ersatzstabsteifigkeiten.

$$K_i = \frac{E \times t_p^3}{12 \times l_i^3} \quad (3-41)$$

K_i - Biegesteifigkeit des Ersatzstabes i

i - Nummerierung der Ersatzstäbe

E - Elastizitätsmodul der Stirnplatte (=21.000 kN/m²)

t_p - Stirnplattendicke

l_i - Länge des Ersatzstabes i

$$\rho_s = \frac{K_2}{K_1 + K_2} \quad (3-42)$$

ρ_s - Verteilungsgröße der effektiven Länge auf den Steg

Für den zweireihigen Stirnplattenstoß lässt sich durch einsetzen vereinfachen:

$$\rho_S = \frac{\frac{E \times t_p^3}{12 \times l_2^3}}{\frac{E \times t_p^3}{12 \times l_1^3} + \frac{E \times t_p^3}{12 \times l_2^3}} = \frac{\frac{1}{l_2^3}}{\frac{1}{l_1^3} + \frac{1}{l_2^3}} = \frac{1}{1 + \frac{l_2^3}{l_1^3}} = \frac{1}{1 + \frac{m^3}{m_2^3}} \quad (3-43)$$

Indem nun die effektive Fließlinienlänge der Schraubenreihe in der Trägerkammer auf den Steg und den Flansch aufgeteilt wird, lässt sich die Beanspruchbarkeit vom Trägersteg und der zugehörigen Schweißnaht über die Länge $l_{eff,1,S}$ ermitteln.

$$l_{eff,1,S} = \rho_S \times l_{eff,1} \quad (\text{vgl. Abbildung 49}) \quad (3-44)$$

$l_{eff,1,S}$ - effektive Fließlinienlänge des Lastabtrags zum Steg

ρ_S - Gewichtungsfaktor für den Lastabtrag zum Steg (vgl. 3.8)

$l_{eff,1}$ - äquivalente Fließlinienlänge in der Trägerkammer (vgl. 3.7)

$$F_{t,w,Rd} = b_{eff,t,w} \times t_w \times \frac{f_{y,w}}{\gamma_{M0}} \quad (3-45)$$

$$\text{mit } b_{eff,t,w} = l_{eff,1,S} \quad (3-46)$$

$$F_{t,w,Rd}^* = l_{eff,1,S} \times t_w \times \frac{f_{y,w}}{\gamma_{M0}} \quad (3-47)$$

$F_{t,w,Rd}^*$ - gewichtete Zugbeanspruchbarkeit des Stegs (vgl. 2.2.2.5)

Die Tragfähigkeit der in der Trägerkammer liegenden Schraubenreihe ergibt sich analog zur globalen Komponentenmethode aus der Summe der maßgebenden Einzeltragfähigkeiten (Lastabtrag über den Trägerflansch, Lastabtrag über den Trägersteg).

Weil die lokale Tragfähigkeit des Trägerflansches auf Zug für Biegebeanspruchungen nicht maßgebend werden kann (dann würde die globale Komponente Trägerflansch auf Druck maßgebend werden), muss die Abminderung nur unter Berücksichtigung des Trägerstegs erfolgen.

$$\text{mit } \rho_F = (1 - \rho_S) \quad (3-48)$$

ρ_F - Verteilungsgröße der effektiven Länge auf den Flansch

$$F_{t,ep,Rd,a} = F_{t,ep,Rd} \times \rho_F + \min(F_{t,ep,Rd} \times \rho_S; F_{t,w,Rd}) \quad (3-49)$$

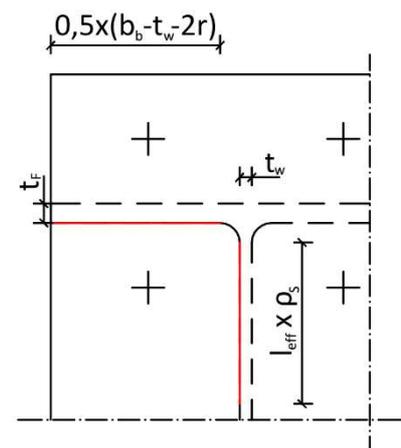


Abbildung 49: Lastverteilung in der Trägerkammer

$F_{t,ep,Rd,a}$ - angepasste Biegetragfähigkeit der Stirnplatte in der Trägerkammer

Die in diesem Exkurs vorgestellte Methode zur Ermittlung der Tragfähigkeit der in der Trägerkammer liegenden Schraubenreihe ist nur bei ausreichendem Plastizierungsvermögen (Querschnittsklasse 1 oder 2) anwendbar. Sollte die Zugtragfähigkeit des Steges maßgebend werden, liefert diese Methode höhere Beanspruchbarkeiten.

3.9 Exkurs: Ermittlung der Mindestschweißnahtdicken für den 2-reihigen Stoß

Die in 3.8 ermittelten Lastabtragsgewichtungsfaktoren können verwendet werden um die in 2.2.2.7 beschriebenen Mindestschweißnahtdicken zu ermitteln.

In der Trägerkammer lassen sich die Mindestschweißnahtdicken zum Flansch und zum Steg wie folgt ermitteln:

Stegnaht:

Die Beanspruchbarkeit der Stegschweißnaht muss mindestens der maßgebenden von den beiden Beanspruchbarkeiten

- Lastabtrag der Stirnplatte in Stegrichtung
- Zugbeanspruchbarkeit des Stegs

entsprechen.

$$F_{w,S,Rd} = \min(F_{t,ep,Rd} \times \rho_S; F_{t,w,Rd}^*) \text{ und } l_{eff,w,S} = 2 \times l_{eff,1} \times \rho_S \quad (3-50)$$

$F_{w,S,Rd}$ - Mindestbeanspruchbarkeit der Stegschweißnaht senkrecht zu ihrer Achse

$F_{t,ep,Rd}$ - Beanspruchbarkeit der Stirnplatte auf Biegung (vgl. 2.2.2.3)

ρ_S - Gewichtungsfaktor für den Lastabtrag zum Steg (vgl. 3.8)

$F_{t,w,Rd}^*$ - gewichtete Zugbeanspruchbarkeit des Stegs (vgl. 3.8)

$$a_s \geq \frac{\beta_w \times \gamma_{M2} \times \sqrt{2} \times F_{w,S,Rd}}{f_u \times l_{eff,w,S}} = \frac{\beta_w \times \gamma_{M2} \times \sqrt{2} \times \min(F_{t,ep,Rd} \times \rho_S; F_{t,w,Rd}^*)}{f_u \times 2 \times l_{eff,1} \times \rho_S} \quad (3-51)$$

$a_{s,i}$ - Mindeststegschweißnahtdicke

Flanschnaht:

Für den bündigen Stoß:

Die Schweißnahtlänge wird auf der Länge der effektiven Fließlinienlänge für den Lastabtrag zum Steg beansprucht. Die Länge der Flanschsweißnaht ist auf Grund der geometrischen Randbedingungen jedoch begrenzt.

$$\text{mit } l_{\text{eff},w,F} = \min(2 \times b_b - t_w - 2 \times r; 2 \times l_{\text{eff},1} \times \rho_F) \text{ und } F_{w,F,Rd,\min} = F_{t,ep,Rd} \times \rho_F \quad (3-52)$$

ρ_F - Gewichtungsfaktor für den Lastabtrag zum Flansch nach 3.8

b_b - Trägerbreite

$F_{w,F,Rd,\min}$ - Mindestbeanspruchbarkeit der Flanschsweißnaht senkrecht zu ihrer Achse

$$a_F \geq \frac{\beta_w \times \gamma_{M2} \times \sqrt{2} \times F_{w,F,Rd,\min}}{f_u \times l_{\text{eff},w,F}} \quad (3-53)$$

$$a_F \geq \frac{\beta_w \times \gamma_{M2} \times \sqrt{2} \times \rho_F \times F_{t,ep,Rd}}{f_u \times \min(2 \times b_b - t_w - 2 \times r; 2 \times l_{\text{eff},1} \times \rho_F)} \quad (3-54)$$

a_F - Mindestflanschsweißnahtdicke

Für den überstehenden Stoß:

$$\text{mit } l_{\text{eff},w,F} = \min(b_b - t_w - 2 \times r; l_{\text{eff},1,1}) + (b_b; l_{\text{eff},1,2} \times \rho_F) \quad (3-55)$$

$$\text{und } F_{w,F,Rd,\min} = F_{t1,Rd} + F_{t2,Rd} \times \rho_F \quad (3-56)$$

$l_{\text{eff},1,1}$ - äquivalente Fließlinienlänge im Stirnplattenüberstand

$l_{\text{eff},1,2}$ - äquivalente Fließlinienlänge im der Trägerkammer

$F_{t1,ep,Rd}$ - Beanspruchbarkeit der Schraubenreihe im Stirnplattenüberstand

$F_{t2,ep,Rd}$ - Beanspruchbarkeit der Schraubenreihe in der Trägerkammer

$$a_F \geq \frac{\beta_w \times \gamma_{M2} \times \sqrt{2} \times F_{w,F,Rd,\min}}{f_u \times l_{\text{eff},w,F}} = \frac{\beta_w \times \gamma_{M2} \times \sqrt{2} \times (F_{t1,ep,Rd} + F_{t2,ep,Rd} \times \rho_F)}{f_u \times \min(2 \times b_b - t_w - 2 \times r; l_{\text{eff},1,1} + l_{\text{eff},1,2} \times \rho_F)} \quad (3-57)$$

4 Beispiele 2-reihiger Stoß

4.1 Bezeichnung

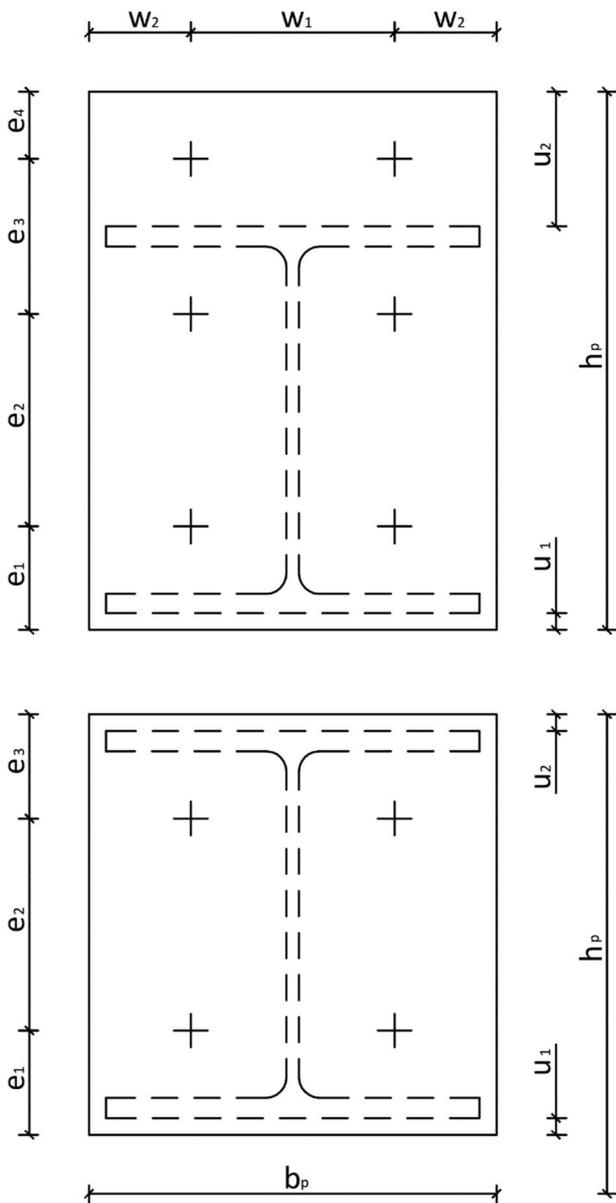


Abbildung 51: Bezeichnung der geometrischen Abmessungen 2-reihig nach Björn Schmidt [16]

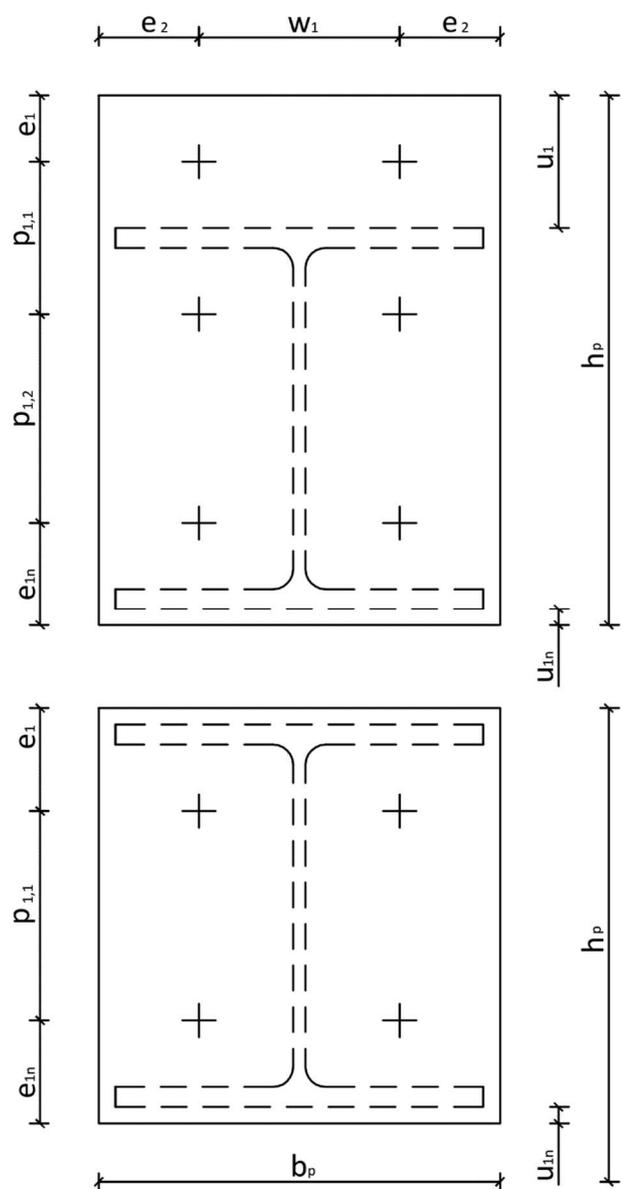


Abbildung 50: Bezeichnung der geometrischen Abmessungen 2-reihig nach DIN EN 1993-1-8 [2] und Typisierte Anschlüsse im Stahlhochbau [1]

Die Bezeichnung der geometrischen Parameter wird in dieser Arbeit analog zur DIN EN 1993-1-8 und zu den typisierten Verbindungen vorgenommen. Alle von Björn Schmidt in seiner Dissertation verwendeten Bezeichnungen wurden aus Gründen der leichteren Vergleichbarkeit in diese einheitliche Bezeichnung überführt.

4.2 Allgemein

Nachfolgend soll jeweils für einen bündigen und einen überstehenden Stirnplattenstoß gemäß des oben beschriebenen Bemessungsverfahrens die Beanspruchbarkeit ermittelt werden. Die Bezeichnung der geometrischen Abmessungen wird analog zur DIN EN 1993-1-8 [2] und den Typisierten Verbindungen [1] gewählt.

Um in Kapitel 7.2 einen Vergleich der Bemessungsverfahren führen zu können, werden hier Anschlussgeometrien gemäß „Typisierte Anschlüsse im Stahlhochbau“ [1] verwendet. Querkräfte werden in den folgenden Beispielen nicht betrachtet.

Das Profil HEA 300 wurde als einziges in „Typisierte Anschlüsse im Stahlhochbau“ [1] geregeltes HEA-Profil identifiziert, welches mit allen Stoßtypen (IH1.1, IH2.1, IH3.1, IH4.1) kombinierbar ist. Für die bündigen Stirnplattenstöße sollen in den folgenden Beispielen M24 Schrauben und für die überstehenden Stirnplattenstöße M20 Schrauben verwendet werden.

Es empfiehlt sich beim Durchlesen der verschiedenen Beispiele das jeweilige Flussdiagramm zur Hilfe zu nehmen. (siehe Seite 112ff)

4.3 Beispiel 1 – bündiger 2-reihiger Stoß

4.3.1 Anschlussgeometrie

Bei den gewählten gestoßenen Trägern handelt sich um einen HEA 300 S235 mit M24 Schrauben. (Ringbuch Nr. 455: IH 1.1 A 30 24) [1]

Nr.	Anschluss			Stirnplatte			Stirnplattengeometrie									Kehln.	
	Träger -profil	Typ	Schr. 10.9	t_p	b_p	h_p	e_1	$p_{1,1}$	$p_{1,2}$	e_{1n}	u_1	u_{1n}	w	p_2	e_2	a_w	a_f
455	HEA 300	IH1.1	M24	30	300	330	85	160		85	20	20	150		75	4	4

Tabelle 3: Beispiel 1: Anschlussgeometrien [mm]

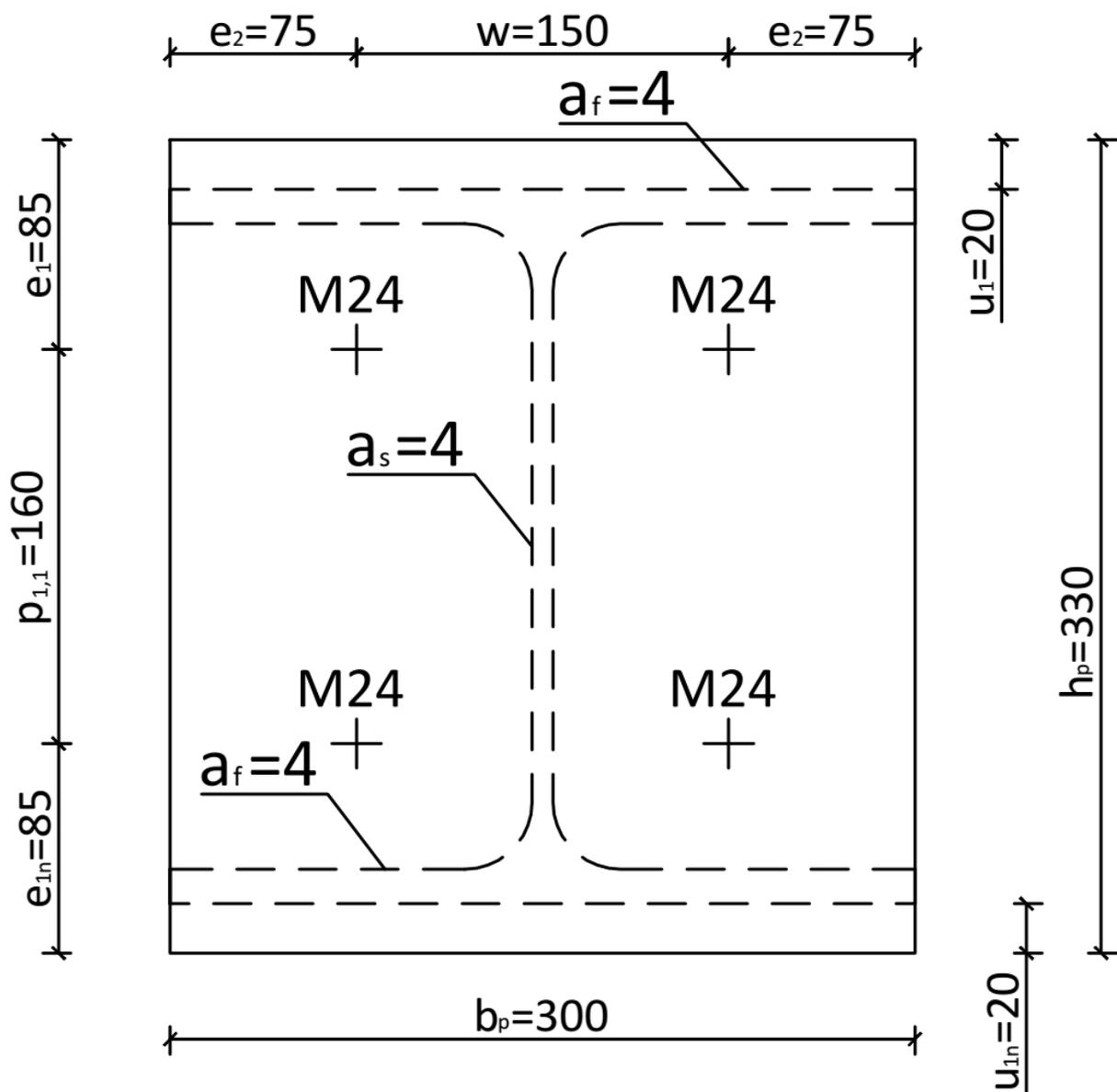


Abbildung 52: Beispiel 1: Anschlussgeometrien [mm]

4.3.2 Berechnung

Fließlinienlänge in der Trägerkammer (neben einer Steife, kein Gruppenversagen)

Komponente 5: Stirnplatte mit Biegebeanspruchung

$$m = \frac{w}{2} - \frac{t_w}{2} - 0,8 \times a_w \times \sqrt{2}$$

$$m = \frac{150}{2} - \frac{8,5}{2} - 0,8 \times 4 \times \sqrt{2} = 66,2 \text{ mm}$$

$$m_2 = e_1 - u_1 - t_f - 0,8 \times a_f \times \sqrt{2}$$

$$m_2 = 85 - 20 - 14 - 0,8 \times 4 \times \sqrt{2} = 46,5 \text{ mm}$$

mit

$$\lambda_1 = \frac{m}{m+e} = \frac{66,2}{66,2+75} = 0,47$$

$$\lambda_2 = \frac{m_2}{m+e} = \frac{46,5}{66,2+75} = 0,33$$

$$\rightarrow \alpha > 2\pi \rightarrow \alpha \approx 6,4$$

$$l_{\text{eff},nc} = \alpha \times m = 6,4 \times 66,22 = 424 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 3-39})$$

$$l_{\text{eff},cp} = 2 \times \pi \times m = 2 \times \pi \times 66,22 = 416 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 3-40})$$

$$l_{\text{eff},1} = \min(l_{\text{eff},1,nc}; l_{\text{eff},1,cp}) = \min(424; 416) = 416 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 3-38})$$

$$L_b = x + 2 \times t_p = 25,5 + 2 \times 30 = 85,5 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 2-5})$$

$$L_b^* = \frac{8,8 \times m^3 \times A_s \times n_b}{\sum l_{\text{eff},1} \times t_p^3} = \frac{8,8 \times 66,2^3 \times 353 \times 1}{424 \times 30^3} = 78,79 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 2-26})$$

$\rightarrow L_b > L_b^*$ es treten keine Abstützkräfte auf

$$m_{pl,Rd} = 0,25 \times t_p^2 \times \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 \times 3^2 \times \frac{23,5}{1,0} = 52,9 \frac{\text{kNmm}}{\text{mm}} \quad (\text{vgl. 2-9})$$

Modus 1 und 2 ohne Abstützkraft

$$F_{T,1-2,Rd} = \frac{2 \times m_{pl,Rd} \times l_{\text{eff},1}}{m} = \frac{2 \times 52,9 \times 416}{66,2} = 664,8 \text{ kN} \quad (\text{vgl. 2-14})$$

Modus 3

$$F_{T,3,Rd} = 2 \times F_{1,Rd} = 2 \times 254,2 = 508,4 \text{ kN} \quad (\text{vgl. 2-15})$$

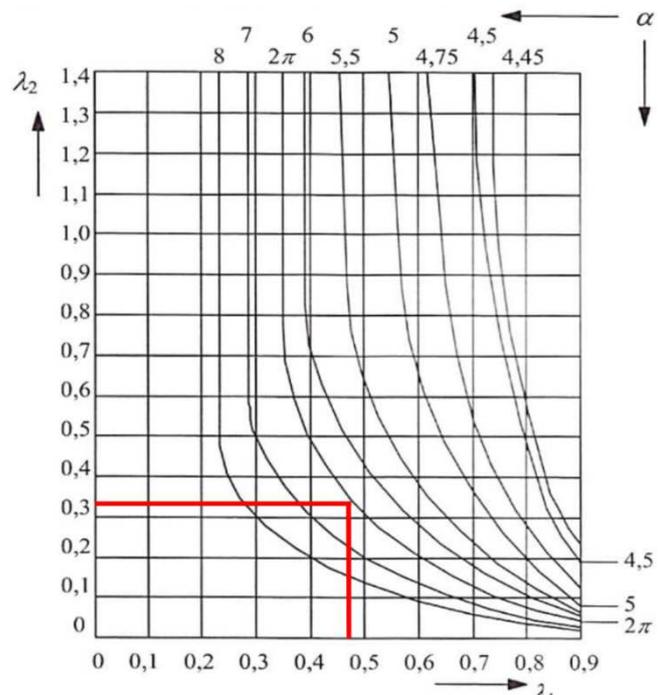


Diagramm 3: Beispiel 1: Alpha-Wert

$$F_{T,ep,Rd} = \min(F_{T,1/2,Rd}; F_{T,3,Rd}) = \min(664,8; 508,4) = 508,4kN \quad (\text{vgl. 2-28})$$

$$\rho_S = \frac{1}{1 + \frac{m^3}{m_2^3}} = \frac{1}{1 + \frac{66,2^3}{46,5^3}} = 0,26 \quad (\text{vgl. 3-43})$$

$$\rho_F = 1 - \rho_S = 1 - 0,26 = 0,74 \quad (\text{vgl. 3-48})$$

$$l_{eff,1,S} = \rho_S \times l_{eff,1} = 0,26 \times 416 = 108mm \quad (\text{vgl. 3-44})$$

$$F_{t,w,Rd}^* = l_{eff,1,S} \times t_w \times \frac{f_{y,w}}{\gamma_{M0}} = 108 \times 8,5 \times \frac{235}{1,0} = 216050N = 216kN \quad (\text{vgl. 3-47})$$

$$F_{t,ep,Rd,a} = F_{t,ep,Rd} \times \rho_F + \min(F_{t,ep,Rd} \times \rho_S; F_{t,w,Rd}^*) \quad (\text{vgl. 3-49})$$

$$F_{t,ep,Rd,a} = 508,4 \times 0,74 + \min(508,4 \times 0,26; 216)$$

$$F_{t,ep,Rd,a} = 376,2 + \min(132,2; 216) = 508,4kN \rightarrow \text{Steg auf Zug nicht maßgebend}$$

$$F_{t1,Rd} = F_{t2,Rd} = F_{t,ep,Rd,a} = 508,4kN$$

Komponente 19: Schweißnähte

$$a_F \geq \frac{\beta_w \times \gamma_{M2} \times \sqrt{2} \times \rho_F \times F_{t,ep,Rd}}{f_u \times \min(2 \times b_b - t_w - 2 \times r; 2 \times l_{eff,1,F} \times \rho_F)} = \quad (\text{vgl. 3-54})$$

$$a_F \geq \frac{0,8 \times 1,25 \times \sqrt{2} \times 0,74 \times 508,4}{36 \times \min(2 \times 30 - 0,85 - 2 \times 2,7; 2 \times 41,6 \times 0,74)}$$

$$a_F \geq \frac{0,8 \times 1,25 \times \sqrt{2} \times 0,74 \times 508,4}{36 \times \min(53,8; 61,6)} = 0,27cm = 2,7mm \leq a_{gewählt} = 4,0mm$$

$$a_S \geq \frac{\beta_w \times \gamma_{M2} \times \sqrt{2} \times \min(F_{t,ep,Rd} \times \rho_S; F_{t,w,Rd}^*)}{f_u \times 2 \times l_{eff,1} \times \rho_S} \quad (\text{vgl. 3-51})$$

$$a_S \geq \frac{0,8 \times 1,25 \times \sqrt{2} \times \min(508,4 \times 0,26; 216)}{36 \times 2 \times 41,6 \times 0,26}$$

$$a_S \geq \frac{0,8 \times 1,25 \times \sqrt{2} \times \min(132,2; 216)}{36 \times 2 \times 41,6 \times 0,26} = 0,24cm = 2,4mm \leq a_{gewählt} = 4,0mm$$

maßgebende Komponente

$$h_1 = h_p - e_1 - u_{1n} - \frac{t_f}{2} = 330 - 85 - 20 - \frac{14}{2} = 218 \text{ mm}$$

$$h_2 = e_{1n} - u_{1n} - \frac{t_f}{2} = 85 - 20 - \frac{14}{2} = 58 \text{ mm}$$

$$F_{c,fb,Rd} = \frac{M_{c,Rd}}{h - t_f} = \frac{325,1}{0,29 - 0,014} = 1177,9 \text{ kN} \quad (\text{vgl. 2-29})$$

elastische Schraubenkraftverteilung:

$$F_{t1,Rd} + F_{t2,Rd} \times \frac{h_2}{h_1} \leq F_{c,fb,Rd} \quad (\text{vgl. 2-55})$$

$$508 + 508 \times \frac{0,058}{0,218} \leq 1177,9$$

$643 \leq 1177,9 \rightarrow$ Flansch und Steg auf Druck nicht maßgebend

$$M_{j,Rd} = F_{t1,Rd} \times h_1 + \frac{F_{t2,Rd}}{h_1} \times h_2^2 = 508,4 \times 0,218 + 508,4 \times \frac{0,058^2}{0,218} = 118,7 \text{ kNm} \quad (\text{vgl. 2-57})$$

zum Vergleich:

Typisierte Verbindungen [1]

$$M_{j,Rd} = 118,7 \text{ kNm}$$

Versagen der Schrauben auf Zug (elastische Schraubenkraftverteilung)

4.4 Beispiel 2 – überstehender 2-reihiger Stoß

4.4.1 Anschlussgeometrie

Bei den gewählten gestoßenen Trägern handelt sich um einen HEA 300 S235 mit M20 Schrauben. (Ringbuch Nr. 455: IH 3.1 A 30 20) [1]

Nr.	Anschluss			Stirnplatte			Stirnplattengeometrie									Kehln.	
	Träger -profil	Typ	Schr. 10.9	t_p	b_p	h_p	e_1	$p_{1,1}$	$p_{1,2}$	e_{1n}	u_1	u_{1n}	w	p_2	e_2	a_w	a_f
455	HEA 300	IH3.1	M20	20	300	380	30	95	180	75	70	20	150	-	75	4	7

Tabelle 4: Beispiel 2: Anschlussgeometrien [mm]

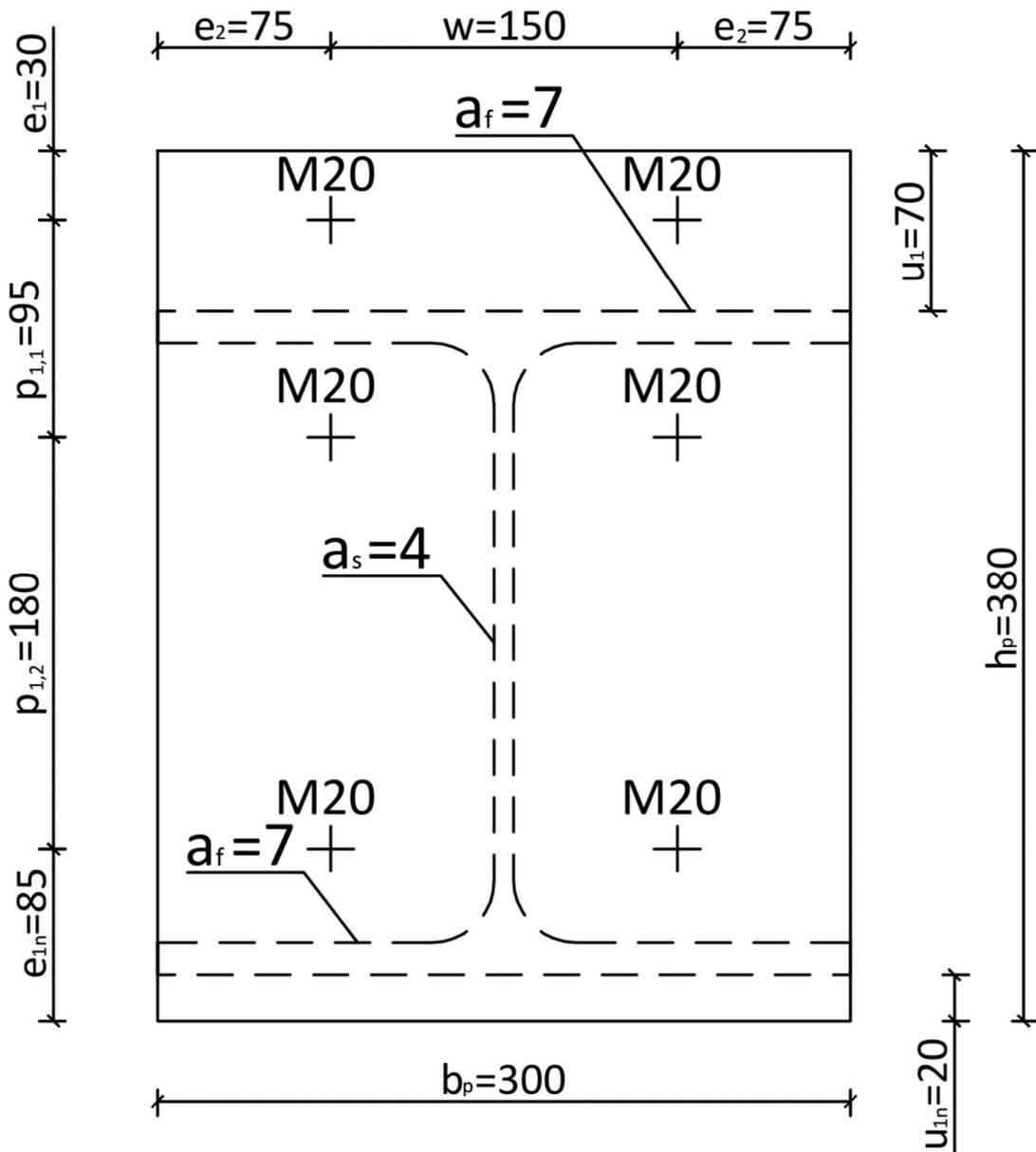


Abbildung 53: Beispiel 2: Anschlussgeometrien [mm]

4.4.2 Berechnung

Komponente 5: Stirnplatte mit Biegebeanspruchung

Schraubenreihe in der Trägerkammer

$$m = \frac{w}{2} - \frac{t_w}{2} - 0,8 \times a_w \times \sqrt{2}$$

$$m = \frac{150}{2} - \frac{8,5}{2} - 0,8 \times 4 \times \sqrt{2} = 66,2 \text{ mm}$$

$$m_2 = e_1 + p_{1,1} - u_1 - t_f - 0,8 \times a_f \times \sqrt{2}$$

$$m_2 = 30 + 95 - 70 - 14 - 0,8 \times 7 \times \sqrt{2} = 33,1 \text{ mm}$$

$$\lambda_1 = \frac{m}{m + e} = \frac{66,2}{66,2 + 75} = 0,47$$

$$\lambda_2 = \frac{m_2}{m + e} = \frac{33,1}{66,2 + 75} = 0,23$$

$$\rightarrow \alpha \approx 7,0$$

$$l_{\text{eff},nc} = \alpha \times m = 7,0 \times 66,2 = 463 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 3-39})$$

$$l_{\text{eff},cp} = 2 \times \pi \times m = 2 \times \pi \times 66,2 = 416 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 3-40})$$

$$l_{\text{eff},1} = \min(l_{\text{eff},1,cp}; l_{\text{eff},1,nc}) = \min(416; 463) = 416 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 3-38})$$

$$L_b = x + 2 \times tp = 22,5 + 2 \times 20 = 62,5 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 2-5})$$

$$L_b^* = \frac{8,8 \times m^3 \times A_s \times n_b}{\sum l_{\text{eff},1} \times t_p^3} = \frac{8,8 \times 66,2^3 \times 245 \times 1}{416 \times 20^3} = 184,4 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 2-26})$$

$\rightarrow L_b < L_b^*$ es treten Abstützkkräfte auf

$$m_{pl,Rd} = 0,25 \times t_p^2 \times \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 \times 2^2 \times \frac{23,5}{1,0} = 23,5 \frac{\text{kNmm}}{\text{mm}} \quad (\text{vgl. 2-10})$$

Modus 1 mit Abstützkraft

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \times m_{pl,Rd} \times l_{\text{eff},1}}{m} = \frac{4 \times 23,5 \times 416}{66,2} = 590,7 \text{ kN} \quad (\text{vgl. 2-7})$$

Modus 2 mit Abstützkraft

$$l_{\text{eff},2} = l_{\text{eff},1,nc} = 463 \text{ mm}$$

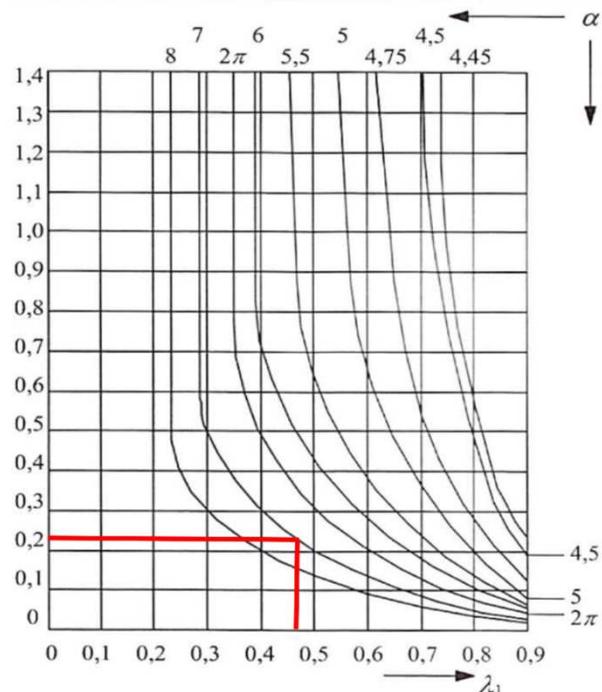


Diagramm 4: Beispiel 2: Alpha-Wert

$$\text{mit } n = e_2 \leq 1,25 \times m \Leftrightarrow 75 \leq 1,25 \times 66,2 \Leftrightarrow \underline{75} \leq 82,75 \quad (\text{vgl. 2-12})$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 \times m_{pl,Rd} \times l_{eff,2} + n \times \sum F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 \times 23,5 \times 463 + 75 \times 2 \times 176,4}{66,2 + 75} = 341,5 \text{ kN} \quad (\text{vgl. 2-11})$$

Modus 3

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 2 \times 176,4 = 352,8 \text{ kN} \quad (\text{vgl. 2-16})$$

Beanspruchbarkeit

$$F_{T,ep,Rd} = \min(F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}) = \min(590,7; \underline{341,5}; 352,8) = 341,5 \text{ kN} \quad (\text{vgl. 2-28})$$

$$\rho_s = \frac{1}{1 + \frac{m^3}{m_2^3}} = \frac{1}{1 + \frac{66,2^3}{33,1^3}} = 0,11 \quad (\text{vgl. 3-43})$$

$$\rho_F = 1 - \rho_s = 1 - 0,11 = 0,89 \quad (\text{vgl. 3-48})$$

$$l_{eff,1,S} = \rho_s \times l_{eff,1} = 0,11 \times 416 = 45,8 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 3-44})$$

$$F_{t,w,Rd}^* = l_{eff,1,S} \times t_w \times \frac{f_{y,w}}{\gamma_{M0}} = 45,8 \times 0,85 \times \frac{23,5}{1,0} = 91,5 \text{ kN} \quad (\text{vgl. 3-47})$$

$$F_{T,ep,Rd,a} = F_{T,ep,Rd} \times \rho_F + \min(F_{t,ep,Rd} \times \rho_s; F_{t,w,Rd}^*) \quad (\text{vgl. 3-49})$$

$$F_{T,ep,Rd,a} = 341,5 \times 0,89 + \min(341,5 \times 0,11; 91,5) = 341,5 \text{ kN}$$

$$F_{t2,Rd} = F_{T,ep,Rd,a} = 341,5 \text{ kN} \quad (\text{vgl. 2-52})$$

Schraubenreihe im Stirnplattenüberstand

$$m_x = u_1 - e_1 - 0,8 \times a_f \times \sqrt{2} = 70 - 30 - 0,8 \times 7 \times \sqrt{2} = 32,1 \text{ mm}$$

$$l_{eff,cp} = \min(2 \times \pi \times m_x; \pi \times m_x + w; \pi \times m_x + 2 \times w) \quad (\text{vgl. 3-36})$$

$$l_{eff,cp} = \min(2 \times \pi \times 32,1; \pi \times 32,1 + 150; \pi \times 32,1 + 2 \times 30)$$

$$l_{eff,cp} = \min(202; 251; 161) = 161 \text{ mm}$$

$$l_{eff,nc} = \min(4 \times m_x + 1,25 \times e_1; 2 \times m_x + 0,625 \times e_1 + 0,5 \times w; 2 \times m_x + 0,625 \times e_1 + e_2; 0,5 \times b_p) \quad (\text{vgl. 3-37})$$

$$l_{eff,nc} = \min(4 \times 32,1 + 1,25 \times 30; 2 \times 32,1 + 0,625 \times 30 + 0,5 \times 150; 2 \times 32,1 + 0,625 \times 30 + 75; 0,5 \times 300)$$

$$l_{eff,nc} = \min(166; 159; 158; \underline{150}) = 150 \text{ mm}$$

$$l_{eff,1} = \min(l_{eff,1,ep}; l_{eff,1,nc}) = \min(161; 150) = 150 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 3-38})$$

$$L_b = x + 2 \times tp = 22,5 + 2 \times 20 = 62,5 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 2-5})$$

$$L_b^* = \frac{8,8 \times m_x^3 \times A_s \times n_b}{\sum l_{eff,1} \times t_p^3} = \frac{8,8 \times 32,1^3 \times 245 \times 1}{150 \times 20^3} = 59,4 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 2-27})$$

→ $L_b > L_b^*$ es treten keine Abstützkräfte auf

Modus 1 und 2 ohne Abstützkraft

$$m_{pl,Rd} = 0,25 \times t_p^2 \times \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 \times 2^2 \times \frac{23,5}{1,0} = 23,5 \frac{\text{kNmm}}{\text{mm}} \quad (\text{vgl. 2-9})$$

$$F_{T,1-2,Rd} = \frac{2 \times m_{pl,Rd} \times \sum l_{eff,1}}{m_x} = \frac{2 \times 23,5 \times 150}{32,1} = 219,6 \text{ kN} \quad (\text{vgl. 2-15})$$

Modus 3

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 2 \times 176,4 = 352,8 \text{ kN} \quad (\text{vgl. 2-16})$$

$$F_{t1,Rd} = F_{t,ep,Rd} = \min(F_{T,1-2,Rd}; F_{T,3,Rd}) = \min(219,6; 352,8) = 219,6 \text{ kN} \quad (\text{vgl. 2-50})$$

Komponente 19: Schweißnähte mit gewichteten Lastabtrag

Flanschsweißnaht:

$$a_F \geq \frac{\beta_w \times \gamma_{M2} \times \sqrt{2} \times (F_{t,ep,Rd,Stirnplattenüberst.} + F_{t,ep,Rd,Trägerkammer} \times \rho_F)}{f_u \times \min(2 \times b_b - t_w - 2 \times r; l_{eff,1,Stirnplattenüberst.} + l_{eff,1,Trägerkammer} \times \rho_F)} \quad (\text{vgl. 3-57})$$

$$a_F \geq \frac{0,8 \times 1,25 \times \sqrt{2} \times (219,6 + 341,5 \times 0,89)}{36 \times \min(2 \times 30 - 0,85 - 2 \times 2,7; 15 + 41,6 \times 0,89)} = \frac{0,8 \times 1,25 \times \sqrt{2} \times (219,6 + 341,5 \times 0,89)}{36 \times \min(53,8; 55,5)}$$

$$a_F \geq 0,38 \text{ cm} = 3,8 \text{ mm}$$

Stegschweißnaht:

$$a_S \geq \frac{\beta_w \times \gamma_{M2} \times \sqrt{2} \times \min(F_{t,ep,Rd,Trägerkammer} \times \rho_S; F_{t,w,Rd}^*)}{f_u \times 2 \times l_{eff,1,Trägerkammer} \times \rho_S} \quad (\text{vgl. 3-51})$$

$$a_S \geq \frac{0,8 \times 1,25 \times \sqrt{2} \times \min(341,5 \times 0,11; 91,5)}{36 \times 2 \times 41,6 \times 0,11} = 0,16 \text{ cm} = 1,6 \text{ mm}$$

Bestimmung der Anfangsrotationssteifigkeit

Schrauben auf Zug

$$k_{10} = 1,6 \times \frac{A_S}{L_B} = 1,6 \times \frac{245}{62,5} = 6,272 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 2-61})$$

Stirnplattenüberstand auf Biegung

$$k_{5,1} = \frac{0,9 \times l_{\text{eff}} \times t_p^3}{m_x^3} = \frac{0,9 \times 150 \times 20^3}{32,1^3} = 32,652 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 2-62})$$

Stirnplatte in der Trägerkammer auf Biegung

$$k_{5,2} = \frac{0,9 \times l_{\text{eff}} \times t_p^3}{m^3} = \frac{0,9 \times 416 \times 20^3}{66,2^3} = 10,324 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 2-62})$$

$$k_{\text{eff},1} = \frac{1}{\frac{1}{k_{10}} + \frac{1}{k_{5,1}} + \frac{1}{k_{5,1}}} = \frac{1}{\frac{1}{6,272} + \frac{1}{32,652} + \frac{1}{32,652}} = 4,53 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 2-63})$$

$$k_{\text{eff},2} = \frac{1}{\frac{1}{k_{10}} + \frac{1}{k_{5,2}} + \frac{1}{k_{5,2}}} = \frac{1}{\frac{1}{6,272} + \frac{1}{10,324} + \frac{1}{10,324}} = 2,83 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 2-63})$$

$$h_1 = h_p - e_1 - u_{1n} - \frac{t_f}{2} = 380 - 30 - 20 - \frac{14}{2} = 323 \text{ mm}$$

$$h_2 = h_p - e_1 - p_{1,1} - u_{1n} - \frac{t_f}{2} = 380 - 30 - 95 - 20 - \frac{14}{2} = 228 \text{ mm}$$

$$z_{\text{eq}} = \frac{k_{\text{eff},1} \times h_1^2 + k_{\text{eff},2} \times h_2^2}{k_{\text{eff},1} \times h_1 + k_{\text{eff},2} \times h_2} = \frac{4,53 \times 323^2 + 2,83 \times 228^2}{4,53 \times 323 + 2,83 \times 228} = 293,9 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 2-64})$$

$$k_{\text{eq}} = \frac{k_{\text{eff},1} \times h_1 + k_{\text{eff},2} \times h_2}{z_{\text{eq}}} = \frac{4,53 \times 323 + 2,83 \times 228}{293,9} = 7,174 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 2-65})$$

Anfangsrotationssteifigkeit

$$S_{j,\text{ini}} = E \times z_{\text{eq}}^2 \times k_{\text{eq}} = 210000 \times 293,9^2 \times 7,174 = 1,301 \times 10^{11} \text{ Nmm/rad} = 130,1 \text{ MNm/rad}$$

(vgl. 2-66)

zum Vergleich typisierte Verbindungen [1]:

$$S_{j,ini} = 129,78 \text{ MNm/rad}$$

Ein Stirnplattenstoß wird der Klasse 3 zugeordnet falls:

$$S_{j,ini} \leq 0,5 \times \frac{E \times I_B}{L_B} = 0,5 \times \frac{210000 \times 182630000}{L_B} = \frac{1,92 \times 10^{13}}{L_B} \quad (\text{vgl. 2-69})$$

Der Stoß kann der Klasse 1 oder 2 zugeordnet werden, wenn

$$L_B \geq \frac{1,92 \times 10^{13}}{1,29 \times 10^{11}} = 152,4 \text{ mm}$$

→ für dieses Beispiel wird von einer Trägerspannweite $L_B > 2,0$ Meter ausgegangen

L_B - hier: Spannweite des Trägers

maßgebende Komponente

Annahme: hier keine Querkraftinteraktion, sodass $M_{c,Rd} = M_{pl,Rd}$

$$F_{c,fb,Rd} = \frac{M_{c,Rd}}{h - t_f} = \frac{325,1}{0,29 - 0,014} = 1177,9 \text{ kN} \quad (\text{vgl. 2-30})$$

$$\sum F_{tr,Rd} \leq F_{c,fb,Rd} \quad (\text{vgl. 2-58})$$

$$\sum 219,6 + 341,5 \leq 1177,9$$

$561,1 \leq 1177,9$ → keine Abminderung erforderlich

$$M_{j,pl,Rd} = F_{t1,Rd} \times h_1 + F_{t2,Rd} \times h_2 = 219,6 \times 0,323 + 341,5 \times 0,228 = 148,8 \text{ kNm} \quad (\text{vgl. 2-57})$$

Typisierte Verbindungen [1]

$$M_{j,Rd} = 173,2 \text{ kNm}$$

Versagen der Stirnplatte auf Biegung und der Schrauben auf Zug

Kommentar:

Die Differenz zwischen der in diesem Beispiel berechneten und in den Typisierten Verbindungen [1] ermittelten Biegetragfähigkeiten ist auf die abweichende Ermittlung der Schraubendehnlänge zurückzuführen.

In den Typisierten Verbindungen wird zur Ermittlung der Dehnlänge L_b einer Schraube abweichend von der DIN EN 1993-1-8 nur eine Unterlegscheibe berücksichtigt.

Für die Schraubenreihe im Stirnplattenüberstand ergibt sich so:

$$L_b = x + 2 \times tp = 18,5 + 2 \times 20 = 58,5 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 2-5})$$

$$L_b = 58,5 \text{ mm} \leq 59,4 \text{ mm} = L_b^* \rightarrow \text{Es treten Abstützkräfte auf}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \times M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 \times 3525}{32,1} = 439,2 \text{ kN} \quad (\text{vgl. 2-7})$$

$$l_{eff,2} = l_{eff,1,nc} = 150 \text{ mm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 \times M_{pl,2,Rd} + n \times \sum F_{t,Rd}}{m+n} = \frac{2 \times 3525 + 30 \times 2 \times 176,4}{32,1 + 30} = 284,0 \text{ kN} \quad (\text{vgl. 2-12})$$

$$F_{t,ep,Rd} = \min(F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}) = \min(439,2; 284; 352,8) = 284,0 \text{ kN} \quad (\text{vgl. 2-28})$$

$$M_{j,pl,Rd} = F_{t1,Rd} \times h_1 + F_{t2,Rd} \times h_2 = 284 \times 0,323 + 341,5 \times 0,228 = 169,6 \text{ kNm} \quad (\text{vgl. 2-57})$$

Es wird vermutet, dass in den typisierten Verbindungen die in 2.2.3.6 beschriebene Vereinfachung angewendet wird, jedoch werden die Schraubenreihenbeanspruchbarkeiten einzeln (für die Schraubenreihe in der Trägerkammer unter Berücksichtigung des Stegs) ermittelt, sodass sich höhere Tragfähigkeiten für die zweite Schraubenreihe ergeben. In DIN EN 1993-1-8 6.2.7.1 (8) [2] wurde diese Betrachtung nicht gestattet.

Für dieses Beispiel würde sich die Biegetragfähigkeit wie folgt ermitteln:

$$M_{j,Rd} = (F_{t1,Rd} + F_{t2,Rd}) \times (h_b - t_f) = (284 + 341,5) \times (0,29 - 0,014) = 172,6 \text{ kNm} \quad (\text{vgl. 2-71})$$

5 Erweiterung auf den 4-reihiger Stoß

5.1 Allgemein

Bei Goldbeck kommen unter anderen vor allem drei Ausführungsvarianten des vierreihigen Stirnplattenstoßes zum Einsatz.

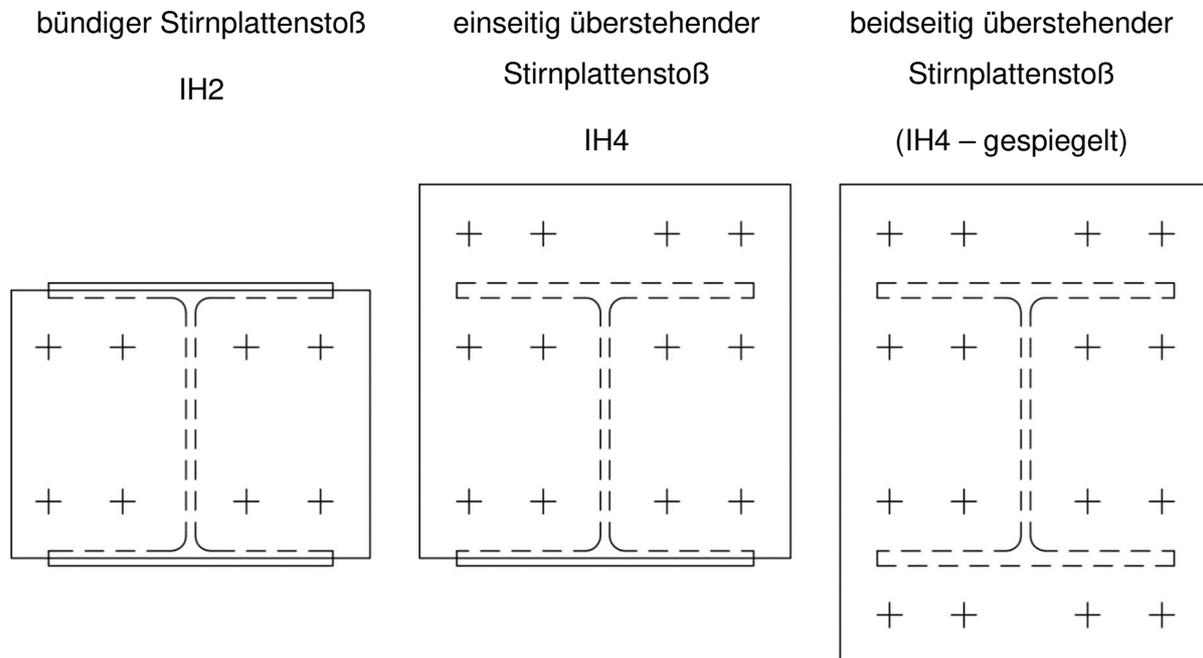


Abbildung 54: 3 Beispiele für 4-reihige Stirnplattenstöße

Die Tragfähigkeiten des vierreihigen Stirnplattenstoßes verhalten sich analog zum zweireihigen Stirnplattenstoß.

5.2 Modell nach Dr.-Ing. Björn Schmidt

5.2.1 Vorstellung

Das in der DIN EN 1993-1-8 geregelte Bemessungsmodell liefert für die Bemessung von bündigen und überstehenden Stirnplattenstößen mit zwei Schrauben in jeder Schraubenreihe bereits Ergebnisse. Dr.-Ing. Björn Schmidt stellt in seiner Dissertation eine Erweiterung der Komponentenmethode um 4-reihige Anschlusskonfigurationen vor. Die am T-Stummelmodell beschriebene Komponente der biegebeanspruchten Stirnplatte stellt hier eine besondere Herausforderung dar.

5.2.2 Fließlinien im Stirnplattenüberstand

Für den überstehenden Stirnplattenbereich der vierreihigen Stirnplattenstöße können die äquivalenten T-Stummellängen analog zum Verfahren nach DIN EN 1993-1-8 ermittelt werden. Die in 3.6 beschriebene Schraubenreihe im Stirnplattenüberstand wird um weitere Gruppenbetrachtungen erweitert, sodass sich für symmetrische Geometrien die unten dargestellten Fließmuster einstellen können.

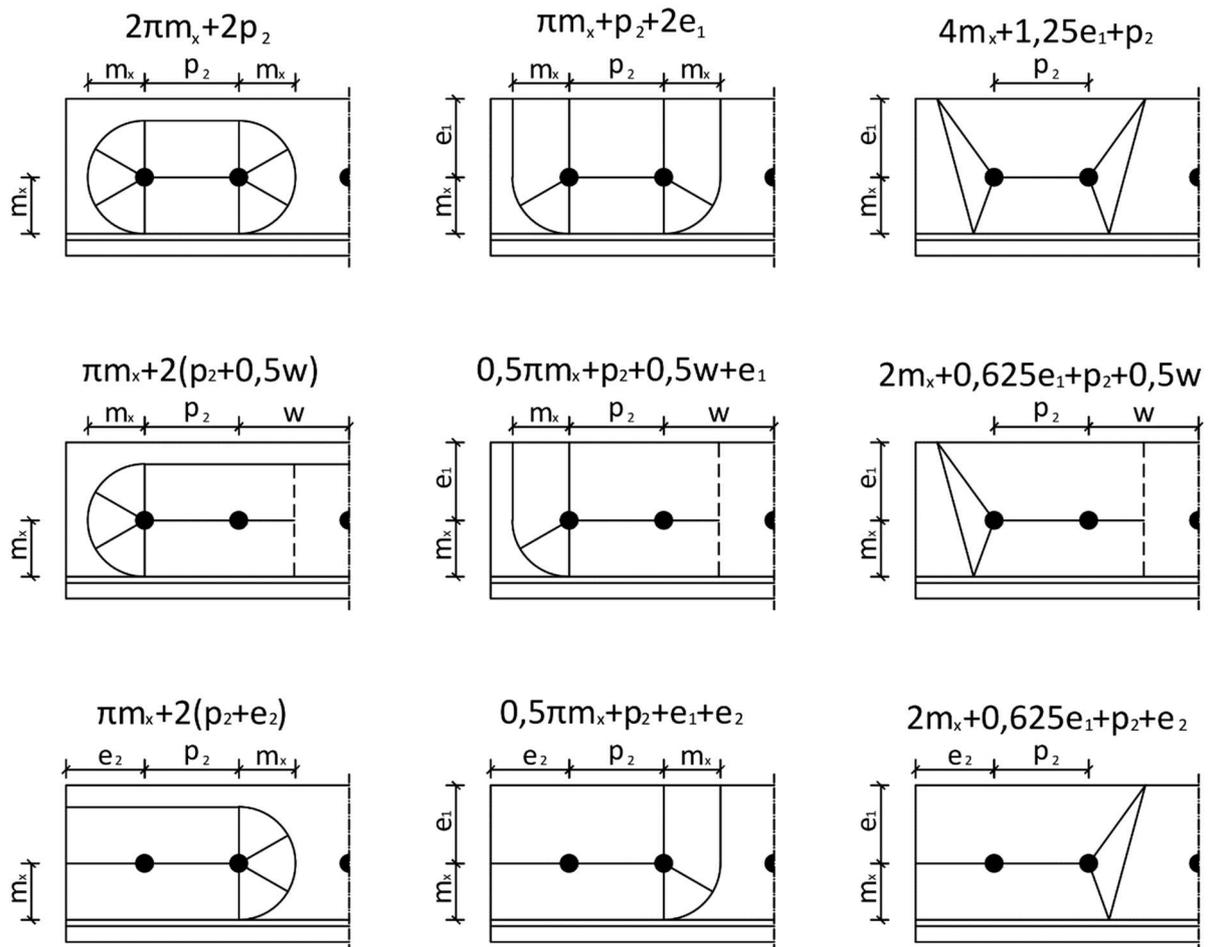


Abbildung 55: Für 4-reihige Anschlüsse erweiterte Fließlinienmuster im Stirnplattenüberstand

$$l_{eff,cp} = \min \left(\begin{array}{l} 2 \times \pi \times m_x + 2 \times p_2; \pi \times m_x + 2 \times (p_2 + 0,5 \times w); \pi \times m_x + 2 \times (p_2 + e_2); \\ \pi \times m_x + p_2 + 2 \times e_1; 0,5 \times \pi \times m_x + p_2 + 0,5 \times w + e_1; 0,5 \times \pi \times m_x + p_2 + e_1 + e_2 \end{array} \right) \quad (5-1)$$

$$l_{eff,nc} = \min(4 \times m_x + 1,25 \times e_1 + p_2; 2 \times m_x + 0,625 \times e_1 + p_2 + 0,5 \times w; 2 \times m_x + 0,625 \times e_1 + p_2 + e_2) \quad (5-2)$$

Für schmalflanschige Profile, bei denen die äußere Schraube nicht mehr vollständig vom Flansch beeinflusst wird, soll eine Überschätzung der lasteinleitenden äquivalenten Fließlinie vermieden werden.

(vgl. Abbildung 56)

Hierzu wird zusätzlich die Breite des Flansches berücksichtigt:

$$l_{eff,nc} = \min\left(\frac{b_p}{2}; \frac{b_b}{2} + \sqrt{2} \times 0,8 \times a_f\right) \tag{5-3}$$

- b_p - Stirnplattenbreite
- b_b - Trägerflanschbreite
- a_f - Schweißnahtdicke zwischen Flansch und Stirnplatte [17]

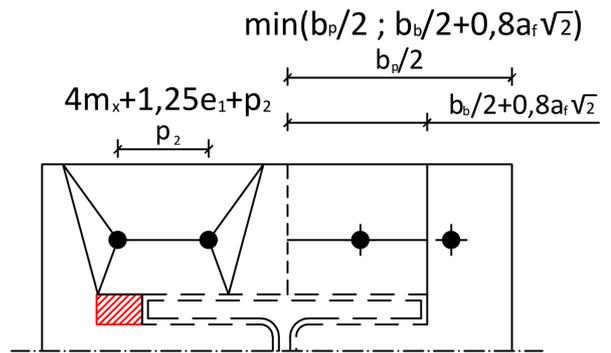


Abbildung 56: links: überschätzte Fließlinienlänge
rechts: angepasstes Fließmuster für schmalflanschige Träger

5.2.3 Fließlinien in der Trägerkammer

5.2.3.1 Fließlinienmuster im Allgemeinen

Die Tragfähigkeit der innerhalb der Trägerkammer liegenden vierreihige Schraubenreihe kann nicht ohne weitere Herleitungen analog zum Verfahren nach DIN EN 1993-1-8 ermittelt werden. Im nachfolgenden Abschnitt soll das von Dr.-Ing. Björn Schmidt in seiner Dissertation [16] entwickelte Verfahren beschrieben werden.

Für den Versagensmodus 1 des reinen Flanschfließens ist nach Björn Schmidt [16] die Schraubenkraftverteilung nicht zu berücksichtigen. Analog zum 2-reihigen Anschluss reicht es aus eine effektive Fließlinie als einzige beeinflussende Größe zu berücksichtigen. Durch die Auswertung von Traglastversuchen konnte gezeigt werden, dass die Annahme einer durch die Schraubenachsen verlaufende plastische Fließlinie berechtigt ist. Ein positiver Einfluss durch die Klemmwirkung der Schrauben muss aufgrund fehlender gesicherter Ergebnisse vernachlässigt werden.

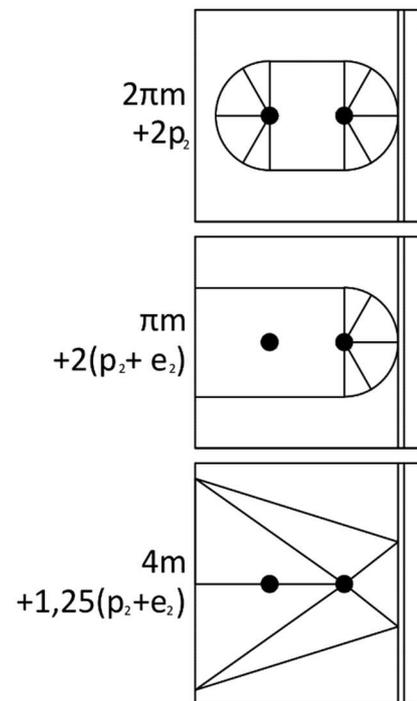


Abbildung 57: Für 4-reihige Anschlüsse erweiterte Fließlinienmuster in der Trägerkammer

Die äußere Arbeit als Produkt der die Strecke δ zurücklegenden Kraft F ermittelt sich gemäß dem Ersatzstabmodells zum reinen Flanschfließen zu:

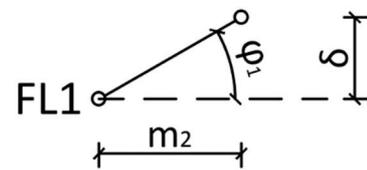
$$\sum A_{A,i} = F \times \delta \quad (5-7)$$

F - Kraft im halben T-Stummel für den Grenzzustand

Durch Anwendung des Prinzips der virtuellen Kräfte lassen sich die Summen der inneren und äußeren Arbeit gleichsetzen:

$$\sum A_{I,i} = \sum A_{A,i} \quad (5-8)$$

Bevor die innere Arbeit mit der äußeren Arbeit gleichsetzt wird, muss die Gleichung der inneren Arbeit so umgeformt werden, dass sich die Summe der inneren Arbeit als Funktion der Fließgelenkverschiebung δ der äußeren Arbeit ergibt.



Durch die vorgegebenen geometrischen Randbedingungen lässt sich die innere Arbeit der Fließlinie 1 wie folgt ermitteln:

Abbildung 59:
Verdrehungsbeziehung
Fließlinie 1

$$l_1 = m + p_2 + e_2 \quad (5-9)$$

mit Abbildung 59 gilt für $\varphi \ll 1$: $\varphi_1 = \frac{\delta}{m_2}$ (5-10)

und Gleichung (5-6): $A_{I,1} = m_{pl} \times l_1 \times \varphi_1 = m_{pl} \times \delta \times \frac{(m + p_2 + e_2)}{m_2}$ (5-11)

Die Herleitung der Fließlinien 2 bis 8 sind in der Dissertation von Björn Schmidt [16] zu finden.

Zusammengefasst ergibt sich die Summe der inneren Arbeit zu:

$$\sum A_{I,i} = m_{pl} \times \delta \times \left(\begin{array}{l} \frac{m + p_2 + e_2}{m_2} \quad [Anteil \text{ aus Fließlinie 1}] \\ + \frac{m_2}{m} \quad [Anteil \text{ aus Fließlinie 2}] \\ + \tan(\alpha) \quad [Anteil \text{ aus Fließlinie 3}] \\ + \frac{m + p_2 + e_2}{m} \times \frac{\cos(\alpha)}{\sin(\beta) \times \cos(\alpha - \beta)} \quad [Anteil \text{ aus Fließlinie 4}] \\ + \frac{\sqrt{m_2^2 + m^2}}{m \times \sin(\gamma)} \times \frac{\cos(\alpha) \times \sin(\beta)}{\cos(\alpha - \beta)} \quad [Anteil \text{ aus Fließlinie 5}] \\ + \frac{\sin(\beta)}{\cos(\alpha) \times \cos(\alpha - \beta)} \quad [Anteil \text{ aus Fließlinie 6}] \\ + \frac{1}{\tan(\beta)} \quad [Anteil \text{ aus Fließlinie 7}] \\ + \frac{p_2 + e_2}{m_2} + \frac{p_2 + e_2}{m} \times \frac{\cos(\alpha)}{\sin(\beta) \times \cos(\alpha - \beta)} \quad [Anteil \text{ aus Fließlinie 8}] \end{array} \right) \quad (5-12)$$

$$\sum A_{I,i} = m_{pl} \times \delta \times \left(\begin{array}{l} \frac{m + 2 \times p_2 + 2 \times e_2}{m_2} + \frac{m_2}{m} + \tan(\alpha) \\ + \frac{m + 2 \times p_2 + 2 \times e_2}{m} \times \frac{\cos(\alpha)}{\sin(\beta) \times \cos(\alpha - \beta)} \\ + \frac{\sqrt{m_2^2 + m^2}}{m \times \sin(\gamma)} \times \frac{\cos(\alpha) \times \sin(\beta)}{\cos(\alpha - \beta)} \\ + \frac{\sin(\beta)}{\cos(\alpha) \times \cos(\alpha - \beta)} + \frac{1}{\tan(\beta)} \end{array} \right) \quad (5-13)$$

δ - senkrecht zur Platte auftretende Verschiebung der Fließgelenken

mit Gl. 5-7 und Gl. 5-13 eingesetzt in Gl. 5-8:

$$m_{pl} \times \delta \times \left(\begin{aligned} & \frac{m + 2 \times p_2 + 2 \times e_2}{m_2} + \frac{m_2}{m} + \tan(\alpha) \\ & + \frac{m + 2 \times p_2 + 2 \times e_2}{m} \times \frac{\cos(\alpha)}{\sin(\beta) \times \cos(\alpha - \beta)} \\ & + \frac{\sqrt{m_2^2 + m^2}}{m \times \sin(\gamma)} \times \frac{\cos(\alpha) \times \sin(\beta)}{\cos(\alpha - \beta)} \\ & + \frac{\sin(\beta)}{\cos(\alpha) \times \cos(\alpha - \beta)} + \frac{1}{\tan(\beta)} \end{aligned} \right) = F \times \delta \quad (5-14)$$

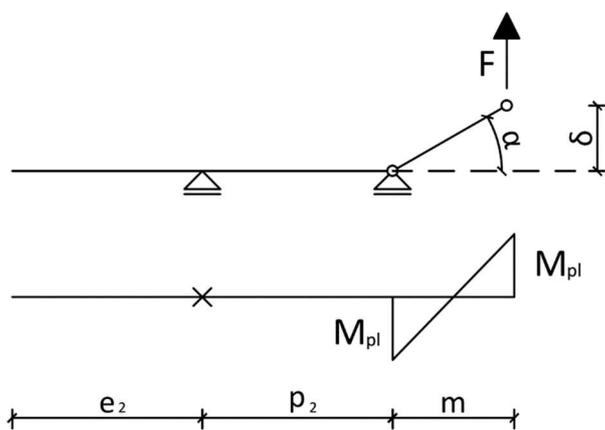


Abbildung 61: Ersatzstabmodell für die Lastabtragrichtung Steg

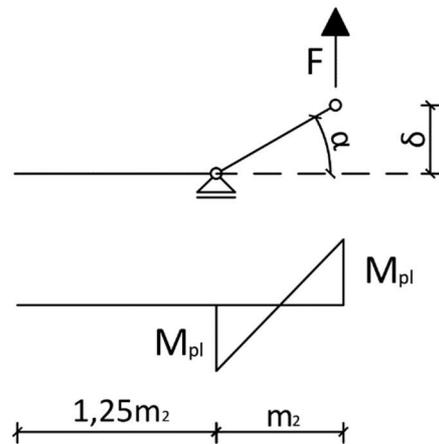


Abbildung 60: Ersatzstabmodell für die Lastabtragrichtung Flansch

Der plastische Momentenverlauf der in Abbildung 61 und Abbildung 60 den Versagenszustand beschreibenden Ersatzstabmodelle lässt sich wie folgt berechnen:

$$2 \times M_{pl} = F \times m \quad (5-15)$$

mit F aus 5-15 in 5-14 ergibt sich umgeformt:

$$M_{pl} = m_{pl} \times \frac{m}{2} \times \left(\begin{aligned} & \frac{m + 2 \times p_2 + 2 \times e_2}{m_2} + \frac{m_2}{m} + \tan(\alpha) \\ & + \frac{m + 2 \times p_2 + 2 \times e_2}{m} \times \frac{\cos(\alpha)}{\sin(\beta) \times \cos(\alpha - \beta)} \\ & + \frac{\sqrt{m_2^2 + m^2}}{m \times \sin(\gamma)} \times \frac{\cos(\alpha) \times \sin(\beta)}{\cos(\alpha - \beta)} \\ & + \frac{\sin(\beta)}{\cos(\alpha) \times \cos(\alpha - \beta)} + \frac{1}{\tan(\beta)} \end{aligned} \right) \quad (5-16)$$

$$\text{mit } M_{pl} = l_{eff,m1} \times m_{pl} \quad (5-17)$$

$$\text{sodass: } l_{eff,m1} = \frac{m}{2} \times \left(\begin{aligned} & \frac{m + 2 \times p_2 + 2 \times e_2}{m_2} + \frac{m_2}{m} + \tan(\alpha) \\ & + \frac{m + 2 \times p_2 + 2 \times e_2}{m} \times \frac{\cos(\alpha)}{\sin(\beta) \times \cos(\alpha - \beta)} \\ & + \frac{\sqrt{m_2^2 + m^2}}{m \times \sin(\gamma)} \times \frac{\cos(\alpha) \times \sin(\beta)}{\cos(\alpha - \beta)} \\ & + \frac{\sin(\beta)}{\cos(\alpha) \times \cos(\alpha - \beta)} + \frac{1}{\tan(\beta)} \end{aligned} \right) \quad (5-18)$$

und mit $\cos(\alpha - \beta) = \sin(\beta)$ umgeformt: (Vergleiche: Abbildung 58: Fließlinienmuster in der Trägerkammer des 4-reihigen Stoßes neben dem Flansch

$$l_{eff,m1} = \frac{m}{2} \times \left(\begin{aligned} & \frac{m + 2 \times p_2 + 2 \times e_2}{m_2} + \frac{m_2}{m} + \frac{\sqrt{1 - \cos^2(\alpha)}}{\cos(\alpha)} \\ & + \frac{m + 2 \times p_2 + 2 \times e_2}{m} \times \frac{\cos(\alpha)}{\sin^2(\beta)} \\ & + \frac{\sqrt{m_2^2 + m^2}}{m \times \sin(\gamma)} \times \cos(\alpha) \\ & + \frac{1}{\cos(\alpha)} + \frac{\sqrt{1 - \sin^2(\beta)}}{\sin(\beta)} \end{aligned} \right) \quad (5-19)$$

mit:

$$\sin(\beta) = \frac{1}{2} \times \frac{\sqrt{(m + p_2 + e_2) \times (3 \times m + 4 \times p_2 + 4 \times e_2)}}{m + m_i + n} \quad (5-20)$$

$$\cos(\alpha) = \frac{1}{2} \times \frac{\sqrt{(m + p_2 + e_2) \times (3 \times m + 4 \times p_2 + 4 \times e_2)}}{m + p_2 + e_2} \times \sqrt{\frac{m}{m + p_2 + e_2}} \quad (5-21)$$

$$\sin(\gamma) = \sin\left(\arctan\left(\frac{m}{m_2}\right)\right) \quad (5-22)$$

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die Winkelfunktionen hier nicht eingesetzt.

5.2.4 Grenztragfähigkeit im Stirnplattenüberstand

Nach Björn Schmidt [16] kann die Grenztragfähigkeit der Schraubenreihe im Überstand eines vierreihigen Stirnplattenstoßes aufgrund der kontinuierlichen Lagerung analog zur in der DIN EN 1993-1-8 beschriebenen Vorgehensweise ermittelt werden.

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \times m_{pl,Platte,d} \times l_{eff,1}}{m_x} \quad (5-23)$$

Zusätzlich sind die Versagensmodi 2 und 3 zu überprüfen, sodass sich die Beanspruchbarkeit wie folgt ermittelt

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 \times m_{pl,2,Rd} \times l_{eff,1} + n_x \times \sum F_{t,Rd}}{m_x + n_x} \quad (5-24)$$

$$n_c = e_1 \leq 1,25 \times m_x \quad (\text{vgl. 2-12}) \quad (5-25)$$

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} \quad (5-26)$$

$$F_{t1,Rd} = F_{ep,Rd} = \min(F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}) \quad (5-27)$$

$F_{t1,Rd}$ - Grenztragfähigkeit der Schraubenreihe im Stirnplattenüberstand

Kommentar:

Björn Schmidt geht in seiner Dissertation davon aus, dass im Stirnplattenüberstand immer eine Abstützkraft auftritt, jedoch wird hierfür in der Dissertation keine Begründung aufgeführt.

Weil das in 2.2.2.2 (Exkurs: Abstützkraft) betrachtete Modell auch hier Anwendung finden kann, soll die Überprüfung trotzdem stattfinden, sodass:

Wird die Bedingung $L_b \leq L_b^*$ nicht eingehalten, ermittelt sich die Tragfähigkeit ohne Abstützkraft wie folgt:

$$F_{T,1-2,Rd} = \frac{2 \times m_{pl,Platte,d} \times l_{eff,1}}{m_x} \quad (5-28)$$

$$F_{t1,Rd} = F_{ep,Rd} = \min(F_{T,1/2,F,Rd}; F_{T,3,F,Rd}) \quad (5-29)$$

5.2.5 Grenztragfähigkeit in der Trägerkammer

5.2.5.1 reines Flanschfließen - Modus 1

Beim zweireihigen Trägerstoß variieren die Abstände der in der Trägerkammer liegende Schraube zum Flansch und zum Steg kaum, sodass eine Gewichtung des Lastabtrags für die Ermittlung der Plattentragfähigkeit keine weitere Beachtung findet. Beim vierreihigen Stirnplattenstoß variieren die Abstände der stegfernen Schraube zum Flansch und zum Steg jedoch stark. Um eine Gewichtung der Tragfähigkeiten beider Lastabtragsrichtungen zu berücksichtigen soll die maßgeblich beeinflussende Größe, die effektive Fließlänge, auf Flansch und Steg aufgeteilt werden. Die Steifigkeitsverteilung in der Platte kann mit einem Stabmodell anschaulich bewertet werden.

Unter Annahme einer Stabbreite von 1 mm ergibt sich für die Einzelstäbe des Modells eine Steifigkeit von:

$$K_i = \frac{E \times t_p^3}{12 \times l_i^3} \quad (5-30)$$

- K_i - Biegesteifigkeit des Ersatzstabes i
 i - Nummerierung der Ersatzstäbe
 E - Elastizitätsmodul der Stirnplatte
 t_p - Stirnplattendicke
 l_i - Länge des Ersatzstabes i

Es ist zu beachten, dass sich die Länge des Ersatzstabes zwischen dem Steg und der äußersten Schraube als Summe der Stabzüge 3 und 4 ergibt. (vgl. Abbildung 62) Über die sich proportional zu den Stabsteifigkeiten verhaltenden Verteilungsgrößen soll die effektive Länge dann aufgeteilt werden.

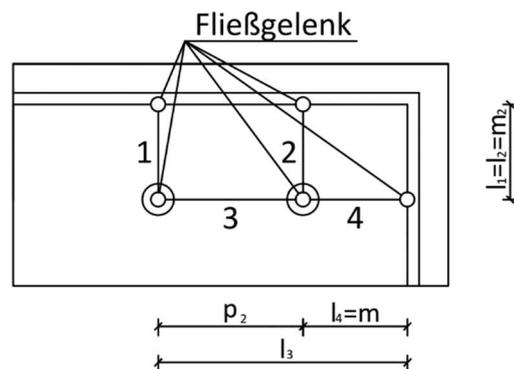


Abbildung 62: Ersatzstabmodell zur Steifigkeitsermittlung

$$\rho_F = \frac{K_1 + K_2}{\sum_{i=1}^4 K_i} = \frac{\frac{1}{l_1^3} + \frac{1}{l_2^3}}{\frac{1}{l_1^3} + \frac{1}{l_2^3} + \frac{1}{l_3^3} + \frac{1}{l_4^3}}$$

$$\rho_F = \frac{\frac{1}{m_2^3} + \frac{1}{m_2^3}}{\frac{1}{m_2^3} + \frac{1}{m_2^3} + \frac{1}{(p_2 + m)^3} + \frac{1}{m^3}} \quad (5-31)$$

ρ_F - Verteilungsgröße der effektiven Fließlinienlänge auf den Flansch

$$\rho_S = \frac{K_3 + K_4}{\sum_{i=1}^4 K_i} = \frac{\frac{1}{(p_2 + m)^3} + \frac{1}{m^3}}{\frac{1}{m_2^3} + \frac{1}{m_2^3} + \frac{1}{(p_2 + m)^3} + \frac{1}{m^3}} = 1 - \rho_F \quad (5-32)$$

ρ_S - Verteilungsgröße der effektiven Fließlinienlänge auf den Steg

$$l_{eff,1,F} = \rho_F \times l_{eff,1} \quad (5-33)$$

$$l_{eff,1,S} = \rho_S \times l_{eff,1} \quad (5-34)$$

$l_{eff,1,F}$ - effektive Fließlinienlänge des Lastabtrags zum Flansch

$l_{eff,1,S}$ - effektive Fließlinienlänge des Lastabtrags zum Steg

Eine Überprüfung ob in der Trägerkammer Abstützkräfte auftreten ist in diesem Nachweismodell nicht vorgesehen. Das Auftreten einer Abstützkraft wird für die folgenden Nachweise generell vorausgesetzt.

Überstehender Stirnplattenstoß

Sollte sich auf der gegenüberliegenden Seite des Flansches im überstehenden Stirnplattenbereich eine Schraubenreihe befinden, lassen sich die Anteile des Flansches und Steges an der Grenztragfähigkeit gemäß des T-Stummelmodells ermitteln.

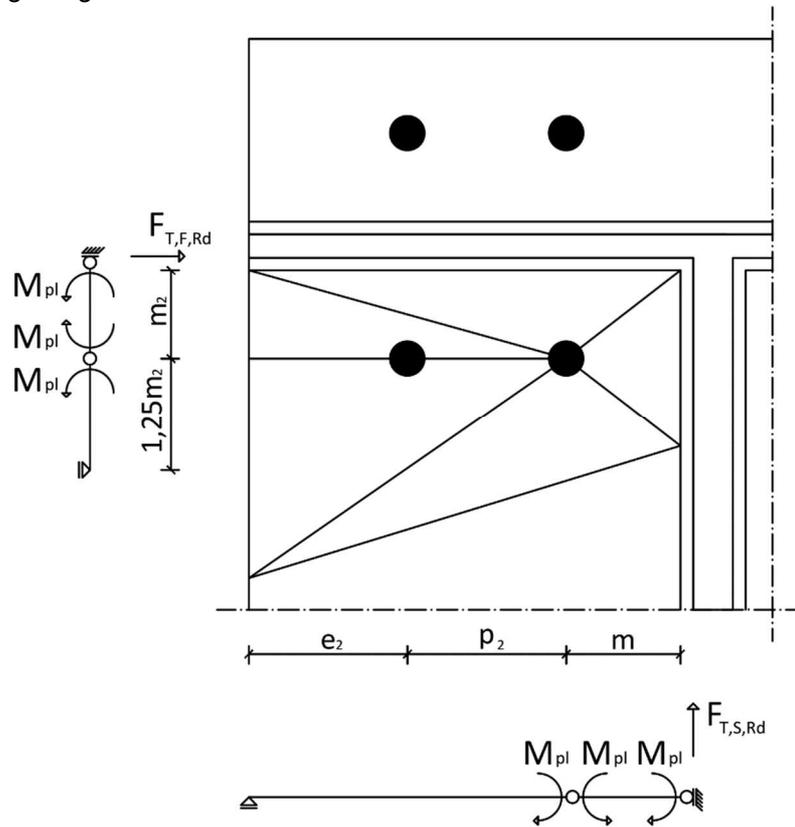


Abbildung 63: Zweiachsiges Versagensmodell für 4 Schrauben in einer Schraubenreihe (Modus 1)

$$F_{T,1,F,Rd} = \frac{4 \times m_{pl,Platte,Rd} \times l_{eff,1,F}}{m_2} \quad (5-35)$$

$$F_{T,1,S,Rd} = \frac{4 \times m_{pl,Platte,Rd} \times l_{eff,1,S}}{m} \quad (5-36)$$

$F_{T,1,F,Rd}$ - Anteil des Flansches an der Grenztragfähigkeit der Schraubenreihe

$F_{T,1,S,Rd}$ - Anteil des Steges an der Grenztragfähigkeit der Schraubenreihe

$m_{pl,Platte,Rd}$ - plastische längenbezogene Biegetragfähigkeit der Platte (siehe 2-10)

Als Summe beider Anteile ergibt sich die Grenztragfähigkeit der innerhalb des Trägerprofils im Zugbereich liegenden Schraubenreihe zu:

$$F_{T,1,Rd} = F_{T,1,F,Rd} + \min(F_{T,1,S,Rd}; F_{t,w,Rd}) \quad (5-37)$$

$F_{T,1,Rd}$ - Grenztragfähigkeit der Schraubenreihe für den Versagensmodus 1 unter Berücksichtigung des Trägerstegs (vgl. 3.8)

Bündiger Stirnplattenstoß

Aufgrund der der fehlenden Schraubenreihe im Stirnplattenüberstand stellt sich die Lasteinleitung in den Trägerflansch für den bündigen Stoß als unsymmetrisch dar. Analog zum T-Stummel Modell kann das Tragverhalten durch ein in der DIN EN 1993-1-8 nicht geregeltes L-Stummel Modell be-

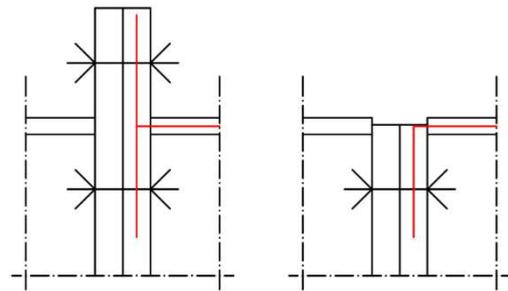


Abbildung 64: T- und L-Stummel-Modell

schrieben werden. (vgl. Abbildung 64) Dem L-Stummel Modell werden aufgrund der gleichen geometrischen Abmessungen auch die gleichen effektiven Fließlinienlängen zugeordnet.

In 2.3 wurde aus Symmetriegründen der Nahtansatzpunkt als Modellgrenze gewählt. Für den L-Stummel trifft dies nicht zu, sodass der Versagensmodus 1 um den Versagensmodus 4 ergänzt werden muss. (vgl. Abbildung 65) Im Modus 4 wird berücksichtigt, dass sich abhängig von der Stirnplatten- und Flanschdicke Fließgelenke im Trägerflansch ausbilden können. Der Modus 4 beschreibt analog zu Modus 1 das Versagen durch reines Flanschfließen.

Somit können die Gleichungen aus 2.3 auch hier angewandt werden. Nach Anpassung der Bezeichnung gilt:

$$F_{T,1-4,F,Rd} = \frac{4 \times m_{pl,Rd} \times l_{eff,1,F}}{m_2} \tag{5-38}$$

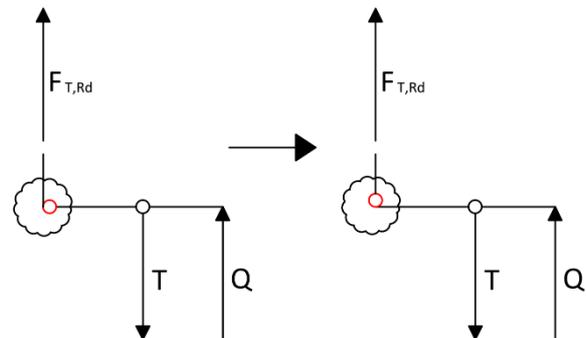


Abbildung 65: Übertragung von T- auf L-Stummel-Modell (Modus 1 – Modus 4)

Die längenbezogene plastische Momententragfähigkeit ermittelt sich durch die Berücksichtigung des Fließgelenkes im Trägerflansch jedoch aus:

$$m_{pl,Rd} = \min \left(m_{pl,Platte,Rd} ; \frac{m_{pl,Platte,Rd} + m_{pl,Flansch,Rd}}{2} \right) \tag{5-39}$$

$m_{pl,Flansch,Rd}$ - plastische längenbezogene Biegetragfähigkeit im Flansch

$$m_{pl,Flansch,Rd} = 0,25 \times t_f^2 \times \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

Der Lastabtraganteil zum Steg verändert sich nicht:

$$F_{T,1,S,Rd} = \frac{4 \times m_{pl,Platte,Rd} \times l_{eff,1,S}}{m} \tag{5-40}$$

Die Grenztragfähigkeit der in der Trägerkammer liegenden Schraubenreihe ergibt sich analog zum überstehenden Stoß zu:

$$F_{T,1-4,Rd} = F_{T,1-4,F,Rd} + \min(F_{T,1,S,Rd} ; F_{t,w,Rd}) \tag{5-41}$$

5.2.5.2 kombiniertes Versagen von Platte und Schraube – Modus 2

Aufgrund der lastverteilenden Wirkung des Flansches treten bei 4-reihigen Anschlusskonfigurationen große Zugkräfte auch in den äußeren Schrauben auf. Für den kombinierten Versagenszustand kann das T-Stummel Modell nicht ohne weitere Modifikationen auf den 4-Schraubenstummel erweitert werden.

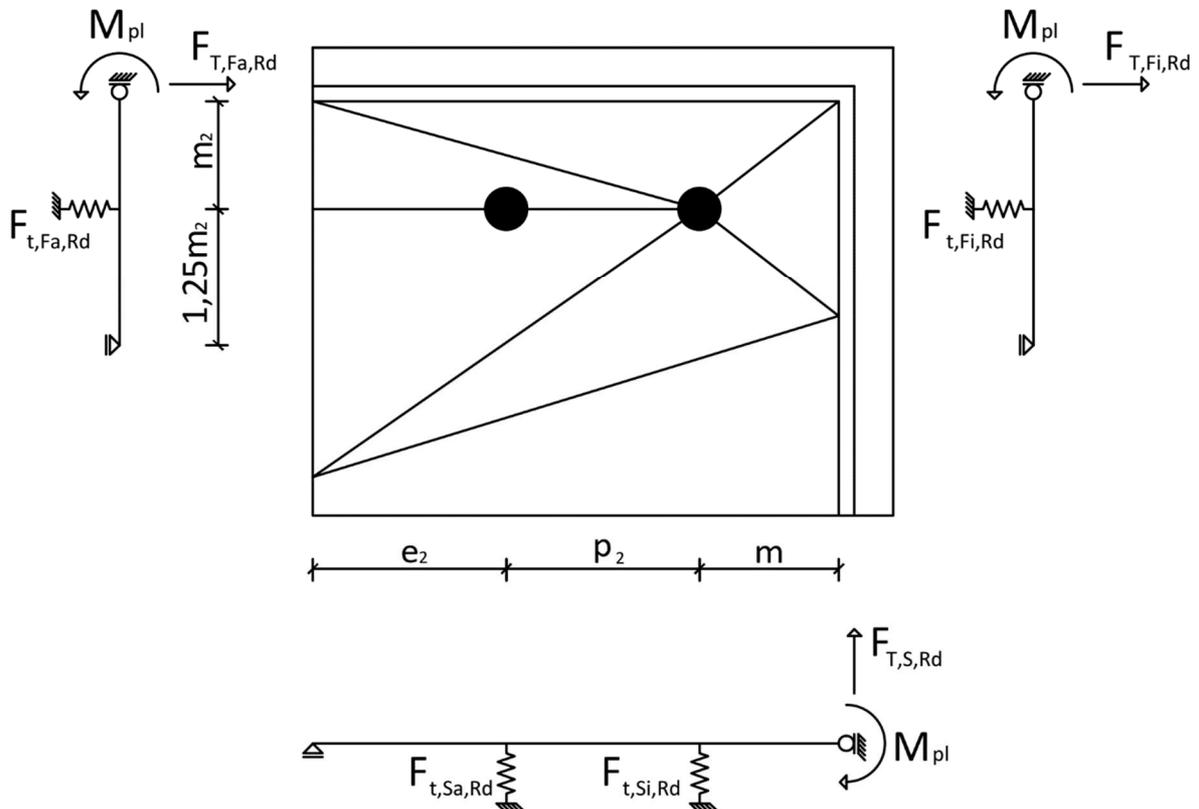


Abbildung 66: Ansatz zum Zweiachsigen Versagensmodell für 4 Schrauben in einer Schraubenreihe (Modus 2)

Anhand einer FE-Simulation konnte nach Björn Schmidt [16] gezeigt werden, dass das einaxiale Stabwerksmodell (T-Stummel) den Lastabtrag zum Flansch nur unzureichend berücksichtigt. Die konservative Schraubenkraftverteilung führt dazu, dass die Grenzzugkraft der inneren Schraube wesentlich früher erreicht wird.

Das in 5.2.5.1 für den Versagenszustand des reinen Flanschfließens (Modus 1) angewendete Modell zur Gewichtung des Lastabtrags zu Steg und Flansch wird auch hier unter Berücksichtigung der Schraubensteifigkeiten angewendet.

Für den Versagenszustand 2 muss gelten, dass neben den Fließgelenken in der Platte auch die Grenzzugkraft in den Schrauben erreicht wird. Die getrennte Betrachtung des Lastabtrags zum Flansch und zum Steg, hat jedoch zur Folge, dass nicht in beide Lastabtragsrichtung ein Versagenszustand hergestellt werden kann.

Versagt die Platte kombiniert mit den Schrauben in Stegrichtung, kann für diesen spezifischen Versagenszustand kein zugehöriges Versagen in Flanschrichtung simuliert werden. (Vgl. Björn Schmidt [16])

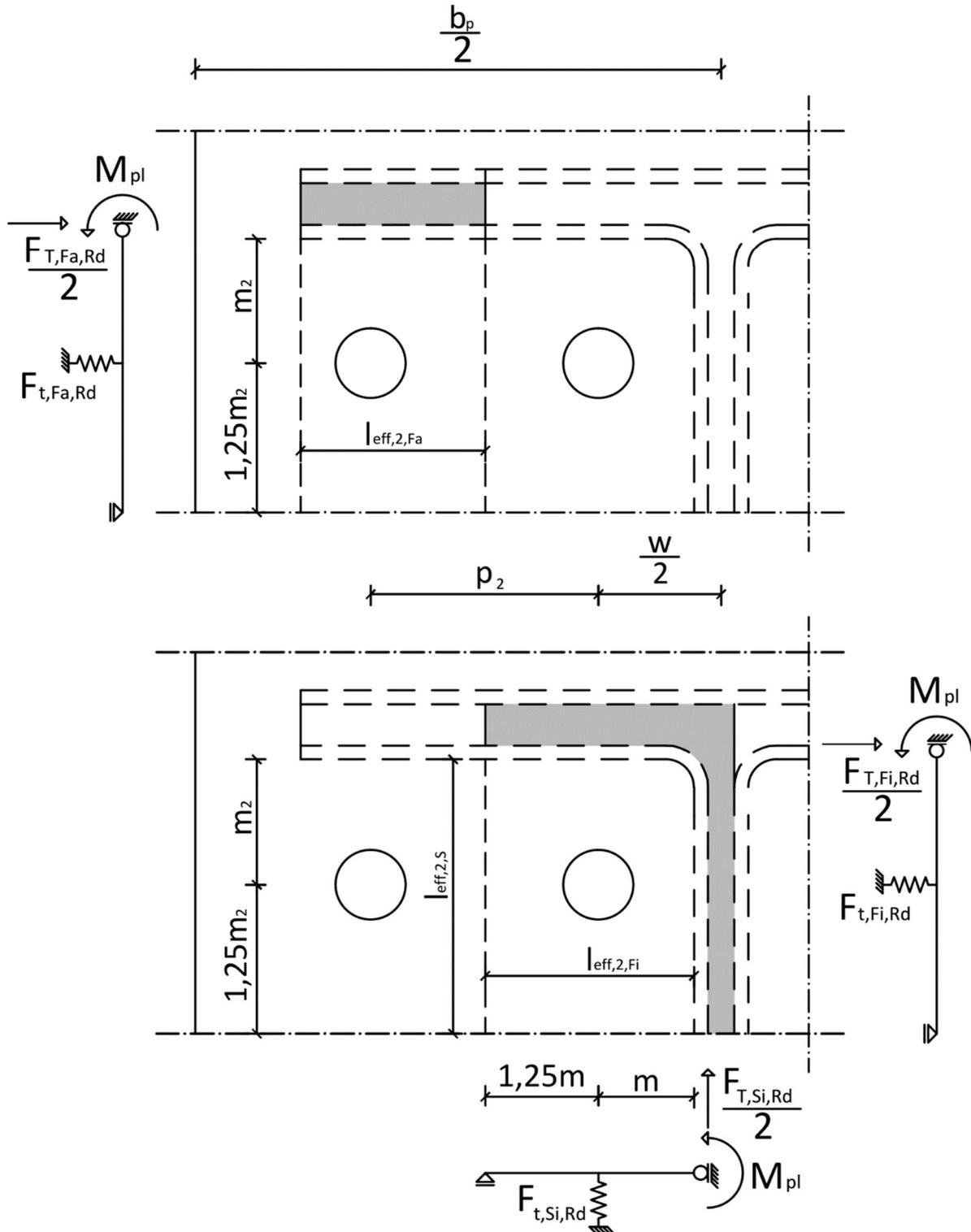


Abbildung 67: Zweiachsiges Versagensmodell für 4 Schrauben in einer Schraubenreihe (Modus 2)

Der als kombiniertes Versagen von Platte und Schraube definierte Versagensmodus 2 kann für den zweiachsigen Lastabtrag somit zunächst nicht erfasst werden.

Mittels der konservativen Annahme, dass der äußere Plattenbereich keine Stegbeeinflussung erfährt, kann dessen Tragfähigkeit vereinfacht beschrieben werden.

Weil sich die Steifigkeiten der inneren und äußeren Schraube in Flanschrichtung nach Abbildung 62 gleich groß sind, kann die dem Flansch zugeordnete Fließlinienlänge $l_{\text{eff},2,F}$ durch den Vergleich der Geometriedaten auf einen inneren Bereich $l_{\text{eff},2,Fi}$ und einen äußeren Bereich $l_{\text{eff},2,Fa}$ aufgeteilt werden. (vgl. Abbildung 67)

$$\rho_{Fi} = \frac{\frac{w}{2} + \frac{p_2}{2}}{\frac{b_b}{2}} \quad (5-42)$$

$$\rho_{Fa} = 1 - \rho_{Fi} \quad (5-43)$$

ρ_{Fi} - Anteil der stegnahen Schraube am Lastabtrag zum Flansch

ρ_{Fa} - Anteil der stegfernen Schraube am Lastabtrag zum Flansch

$$l_{\text{eff},2,Fi} = \rho_{Fi} \times l_{\text{eff},2,F} \quad (5-44)$$

$$l_{\text{eff},2,Fa} = \rho_{Fa} \times l_{\text{eff},2,F} \quad (5-45)$$

b_b - Trägerbreite

$l_{\text{eff},2,F}$ - effektive Fließlinienlänge des Lastabtrags zum Flansch gemäß 5-23

$l_{\text{eff},2,Fi}$ - effektive Fließlinienlänge des Lastabtrags zum inneren Bereich des Flansches

$l_{\text{eff},2,Fi}$ - effektive Fließlinienlänge des Lastabtrags zum äußeren Bereich des Flansches

Die Lastabtragsgewichtungsfaktoren ρ_F und ρ_S sind für die Versagensmodi 1 und 2, weil für den zweiten Versagensmodus der Lastabtrag der äußeren Schraube zum Steg vernachlässigt wird, eigentlich nicht identisch. In Anlehnung an Björn Schmidt [16] wird diese kleine Ungenauigkeit jedoch vernachlässigt.

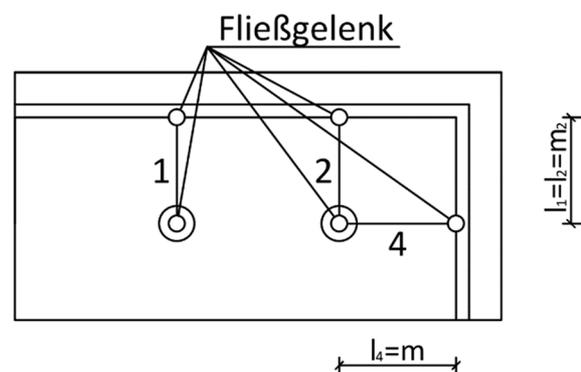


Abbildung 68: Ersatzstabmodell für den Versagensmodus 2 (vgl. Abbildung 62)

Die vorgenommene Aufteilung der Fließlinienlänge liefert für schmalflanschtige Profile (z.B. IPE) aufgrund der ungünstigen Lastverteilung für die äußere Schraube deutlich geringere Zugkräfte als bei breitflanschtigen Profilen (HEA, HEB). (vgl. Abbildung 69)

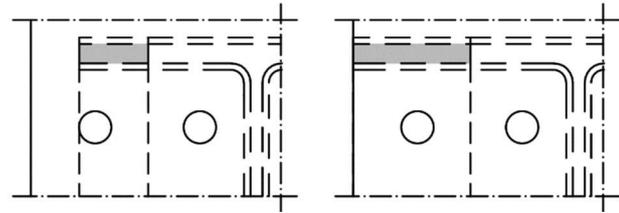


Abbildung 69: Lastverteilung bei schmal- und breitflanschtigen Profilen

Um die Verteilung der Fließlinienlänge bei schmalflanschtigen Profilen optimieren zu können sind weitere Studien notwendig.

Überstehender Stirnplattenstoß

Der Tragfähigkeitsanteil des Flansches kann für einen überstehenden Stirnplattenstoß bei welchem sich die symmetrische Biegeverformung des T-Stummel-Modells einstellt analog zum zweireihigen Stoß ermittelt werden. Die Lage der sich einstellenden Abstützkraft Q wird analog zur in der DIN EN 1993-1-8 definierten Grenze mit $n = 1,25 \times m$ beschrieben.

Die Tragfähigkeit des isoliert betrachteten äußeren zum Flansch abtragenden Plattenbereichs ermittelt sich zu:

$$F_{T,2,Fa,Rd} = \frac{2 \times m_{pl,Platte,Rd} \times l_{eff,2,Fa} + 2 \times F_{t,Rd} \times 1,25 \times m_s}{1,25 \times m_2 + m_2} \quad (5-46)$$

$l_{eff,2,Fa}$ - äußerer Bereich der dem Flansch zugeordneten Fließlinienlänge

Die Beanspruchbarkeit der inneren Schraube in der Trägerkammer kann analog zu Gleichung 5-36 mit dem T-Stummel-Modell über den Trägersteg beschrieben werden. Gemäß der Gewichtung der Tragfähigkeiten über den Steg und den Flansch ergibt sich die Tragfähigkeit vorerst zu:

$$F_{T,2,S,Rd} = \frac{2 \times m_{pl,Platte,Rd} \times (l_{eff,2,Fi} + l_{eff,2,S}) + 2 \times F_{t,Rd} \times 1,25 \times m}{1,25 \times m + m} \quad (5-47)$$

Der positive Einfluss des reduzierten Abstands zum Trägerflansch bleibt aufgrund der Ausrichtung zum Trägersteg unberücksichtigt.

Weiter gilt es zu überprüfen ob der Steg selber die Belastung durch den Lastabtrag der inneren Schraube zum Steg aufnehmen kann. Die Belastung des Stegs durch diese Stegnahe Schraube lässt sich über die entsprechenden Fließlinienlängen ermitteln.

$$F_{T,2,Si,Rd} = \frac{\left(\frac{2 \times m_{pl,Platte,Rd} \times (l_{eff,2,Fi} + l_{eff,2,S}) + 2 \times F_{t,Rd} \times 1,25 \times m}{m + 1,25 \times m} \right)}{(l_{eff,2,Fi} + l_{eff,2,S})} \times l_{eff,2,S} \quad (5-48)$$

$F_{T,Fi,Rd}$ - zum Steg abtragender Tragfähigkeitsanteil der stegnahen Schraube

$$F_{T,2,Fi,Rd} = \frac{\left(\frac{2 \times m_{pl,Platte,Rd} \times (l_{eff,2,Fi} + l_{eff,2,S}) + 2 \times F_{t,Rd} \times 1,25 \times m}{m + 1,25 \times m} \right)}{(l_{eff,2,Fi} + l_{eff,2,S})} \times l_{eff,2,Fi} \quad (5-49)$$

$F_{T,Fi,Rd}$ - zum Flansch abtragender Tragfähigkeitsanteil der stegnahen Schraube

Die Zugtragfähigkeit des mittragenden nach Stegs ermittelt sich nach 2-31 mit $b_{eff,t,w} = l_{eff,2,S}$:

$$F_{t,w,Rd} = l_{eff,2,S} \times t_w \times \frac{f_{y,w}}{\gamma_{M0}} \quad (5-50)$$

t_w - Stegdicke

$f_{y,w}$ - Streckgrenze des Steges

γ_{M0} - Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchbarkeit von Querschnitten (gemäß DIN EN 1993-1-1/NA) = 1,0

Die Tragfähigkeit der Stegnahen Schraube ermittelt sich unter Berücksichtigung des Trägersteg nach:

$$F_{T,2,S,Rd} = F_{T,2,Fi,Rd} + \min(F_{T,2,Si,Rd}; F_{t,w,Rd}) \quad (5-51)$$

Die Beanspruchbarkeit der Schraubenreihe in der Trägerkammer des überstehenden Stirnplattenstoßes beträgt:

$$F_{T,2,Rd} = F_{T,2,Fi,Rd} + F_{T,2,S,Rd} \quad (5-52)$$

Bündiger Stirnplattenstoß

Analog zum reinen Flanschfließen nach Modus 1 in 5.2.5.1 muss auch für das kombinierte Versagen von Platte und Schraube das unsymmetrische L-Stummel Modell berücksichtigt werden. Zusätzlich zum Modus 2, welcher die Ausbildung eines Fließgelenkes in der Platte beschreibt, wird der der Versagensmodus 5 eingeführt, welcher ein Fließgelenk im Trägerflansch berücksichtigt. (vgl. Abbildung 70)

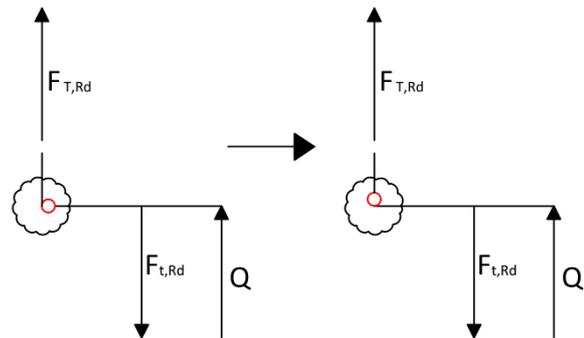


Abbildung 70: Übertragung von T- auf L-Stummel-Modell (Modus 2 – Modus 5)

Analog zu 5.2.5.1 beträgt die längenbezogenen Biegebeanspruchbarkeit mit dem Fließgelenk im Trägerflansch:

$$m_{pl,Rd} = \min(m_{pl,Platte,Rd}; m_{pl,Flansch,Rd}) \text{ sodass:} \quad (5-53)$$

$$F_{T,2-5,Fa,Rd} = \frac{2 \times m_{pl,Rd} \times l_{eff,2,Fa} + 2 \times F_{t,Rd} \times 1,25 \times m_s}{m_2 + 1,25 \times m_2} \quad (5-54)$$

Der innere Bereich des bündigen Stirnplattenstoßes wird analog zum Modell für überstehende Geometrien mit der Gleichung 5-51 beschrieben.

Die Beanspruchbarkeit der Schraubenreihe in der Trägerkammer des bündigen Stirnplattenstoßes beträgt für den Versagensmodus 2-5:

$$F_{T,2-5,Rd} = F_{T,2-5,Fa,Rd} + F_{T,2,S,Rd} \quad (5-55)$$

5.2.5.3 Schraubenversagen – Modus 3

Der Versagensmodus 3 als reines Schraubenversagen tritt nur bei sehr großen Plattendicken auf. Die Grenztragfähigkeit der Schraubenreihe ergibt sich als Summe der Schraubenzugtragfähigkeiten wie folgt:

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} \quad (5-56)$$

$F_{t,Rd}$ - Grenzzugtragfähigkeit einer Schraube nach
DIN EN 1993-1-8 [16]

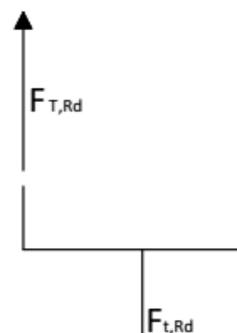


Abbildung 71: Modus 3 für das L-Stummel-Modell

5.3 Exkurs: Ermittlung der Mindestschweißnahtdicken für den 4-reihigen Stoß

Analog zu 3.9 ermittelt sich auch für den vierreihigen Stoß die Schweißnahtdicke über die Beanspruchbarkeiten der anderen Komponenten.

Aus den verschiedenen in 5.2.5 ermittelten Beanspruchbarkeiten für den Lastabtrag zum Flansch und zum Steg lassen sich die maßgebenden Mindestbeanspruchbarkeiten der Schweißnähte ermitteln.

Stegnaht:

$$a_S \geq \frac{\beta_w \times \gamma_{M2} \times \sqrt{2} \times F_{w,s,Ed}}{f_u \times l_{eff,w,s}} \quad (5-57)$$

$l_{eff,1}$ - äquivalente Fließlinienlänge im der Trägerkammer

a_S - Mindeststegschweißnahtdicke

$F_{w,s,Ed}$ - Mindestbeanspruchbarkeit der Stegschweißnaht

$$l_{eff,w,s} = 2 \times l_{eff,1} \times \rho_S \quad (5-58)$$

$l_{eff,1}$ - äquivalente Fließlinienlänge in der Trägerkammer

ρ_S - Gewichtungsfaktor für den Lastabtrag zum Steg nach 3.8

Die maßgebende Mindeststegnahtbeanspruchbarkeit ermittelt sich für die drei Versagensmodi unterschiedlich.

$$\text{Modus 1: } F_{w,s,Ed} = \min(F_{T,1,S,Rd}; F_{t,w,Rd}^*) \quad (5-59)$$

$$\text{Modus 2: } F_{w,s,Ed} = \min(F_{T,2,Si,Rd}; F_{t,w,Rd}^*) \quad (5-60)$$

$$\text{Modus 3: } F_{w,s,Ed} = \min(F_{T,3,Rd} \times \rho_S; F_{t,w,Rd}^*) \quad (5-61)$$

$F_{t,w,Rd}^*$ - gewichtete Zugbeanspruchbarkeit des Stegs

Flanschnaht:

$$a_F \geq \frac{\beta_w \times \gamma_{M2} \times \sqrt{2} \times F_{w,F,Ed}}{f_u \times l_{eff,w,F}} \quad (5-62)$$

für den bündigen Stoß:

$$l_{eff,w,F} = \min(2 \times b_b - t_w - 2 \times r; 2 \times l_{eff,1,F}) \quad (5-63)$$

$$\text{Modus 1: } F_{w,F,Ed} = F_{T,1-4,F,Rd} \quad (5-64)$$

$$\text{Modus 2: } F_{w,F,Ed} = F_{T,2-5, Fa, Rd} + F_{T,2, Fi, Rd} \quad (5-65)$$

$$\text{Modus 3: } F_{w,F,Ed} = F_{T,3, Rd} \times \rho_S \quad (5-66)$$

für den überstehenden Stoß:

$$l_{eff, w, F} = \min(b_b - t_w - 2 \times r; l_{eff, 1, F}) + \min(b_b; 2 \times l_{eff, 1}) \quad (5-67)$$

$$\text{Modus 1: } F_{w,F,Ed} = F_{t1, Rd} + F_{T,1-4, F, Rd} \quad (5-68)$$

$$\text{Modus 2: } F_{w,F,Ed} = F_{t1, Rd} + F_{T,2, Fa, Rd} + F_{T,2, Fi, Rd} \quad (5-69)$$

$$\text{Modus 3: } F_{w,F,Ed} = F_{t1, Rd} + F_{T,3, Rd} \times \rho_F$$

(5-70)

5.4 Rotationskapazität des 4-reihigen Stoßes

Die Steifigkeitskoeffizienten für den vierreihigen Stoß werden von Björn Schmidt in seiner Arbeit hergeleitet: [16, p. 172ff] Da die plastische Schraubenkraftverteilung nur für den überstehenden Stirnplattenstoß angesetzt werden soll, wird an dieser Stelle der bündige Stoß nicht berücksichtigt.

Die Ermittlung der Federkennwerte für den Stirnplattenüberstand findet analog zur DIN EN 1993-1-8 mit 4 anstelle von 2 Schrauben wie folgt statt: (vgl. 2.2.3.5)

$$k_{eff,1} = \frac{1}{\frac{1}{k_{10,1}} + \frac{2}{k_{5,1}}} \quad (5-71)$$

Mit der doppelten Schraubenanzahl ergibt sich die Federsteifigkeit der Schrauben in der Schraubenreihe wie folgt:

$$k_{10,1} = 2 \times 1,6 \times \frac{A_S}{L_b} = 3,2 \times \frac{A_S}{L_b} \quad (5-72)$$

$k_{10,1}$ - Schraubensteifigkeitskoeffizient im Stirnplattenüberstand

A_S - Schaftdurchmesser der Schraube

L_b - Schraubendehnlänge

Die Federsteifigkeit der Stirnplatte im Überstand beträgt:

$$k_{5,1} = \frac{0,9 \times l_{eff,1} \times t_p^3}{m_x^3} \quad (5-73)$$

$l_{eff,1}$ - zugehörige äquivalente Fließlinienlänge für den Stirnplattenüberstand

t_p - Plattendicke

m_x - nach Abbildung 4

Die Steifigkeitsanteile in der Trägerkammer werden analog zur Tragfähigkeitsermittlung für die Lastabtragsrichtungen zum Flansch und zum Steg getrennt ermittelt. (vgl. Abbildung 67:)

In Flanschrichtung ermittelt sich der Steifigkeitskoeffizient wie folgt:

$$k_{eff,2,F} = \frac{1}{\frac{1}{k_{10,2}} + \frac{2}{k_{5,2,F}}} \quad (5-74)$$

Für jede Lastabtragsrichtung mit jeweils zwei Schrauben, sodass:

$$k_{10,2} = 1,6 \times \frac{A_s}{L_b} \quad (5-75)$$

$k_{10,2}$ - Schraubensteifigkeitskoeffizient für den Lastabtrag in der Trägerkammer zum Flansch

$$k_{5,2,F} = \frac{0,9 \times l_{eff,F} \times t_p^3}{m_2^3} \quad (5-76)$$

$k_{5,2,F}$ - Federsteifigkeit der Stirnplatte für den Lastabtrag in der Trägerkammer zum Flansch

$l_{eff,F}$ - zugehörige äquivalente Fließlinienlänge für den Lastabtrag zum Flansch

m_2 - nach Abbildung 4

In Stegrichtung ermittelt sich der Steifigkeitskoeffizient wie folgt:

$$k_{eff,2,S} = \frac{1}{\frac{1}{k_{10,2}} + \frac{2}{k_{5,2,S}}} \quad (5-77)$$

jedoch mit: (vgl. Abbildung 67:)

$$k_{5,2,S} = \frac{0,9 \times l_{eff,S} \times t_p^3}{m^3} \quad (5-78)$$

$k_{5,2,F}$ - Federsteifigkeit der Stirnplatte für den Lastabtrag zum Steg

m - nach Abbildung 4

$l_{eff,S}$ - äquivalente Fließlinienlänge für den Lastabtrag zum Flansch

Der Steifigkeitskoeffizient der Schraubenreihe in der Trägerkammer beträgt demnach:

$$k_{eff,2} = k_{eff,2,S} + k_{eff,2,F} \quad (5-79)$$

analog zu 2.2.3.5:

$$z_{eq} = \frac{k_{eff,1} \times h_1^2 + k_{eff,2} \times h_2^2}{k_{eff,1} \times h_1 + k_{eff,2} \times h_2} \quad (5-80)$$

$$k_{eq} = \frac{k_{eff,1} \times h_1 + k_{eff,2} \times h_2}{z_{eq}} \quad (5-81)$$

$$S_{j,ini} = E \times z_{eq}^2 \times k_{eq} \quad (5-82)$$

6 Beispiele 4-reihiger Stoß

6.1 Bezeichnung

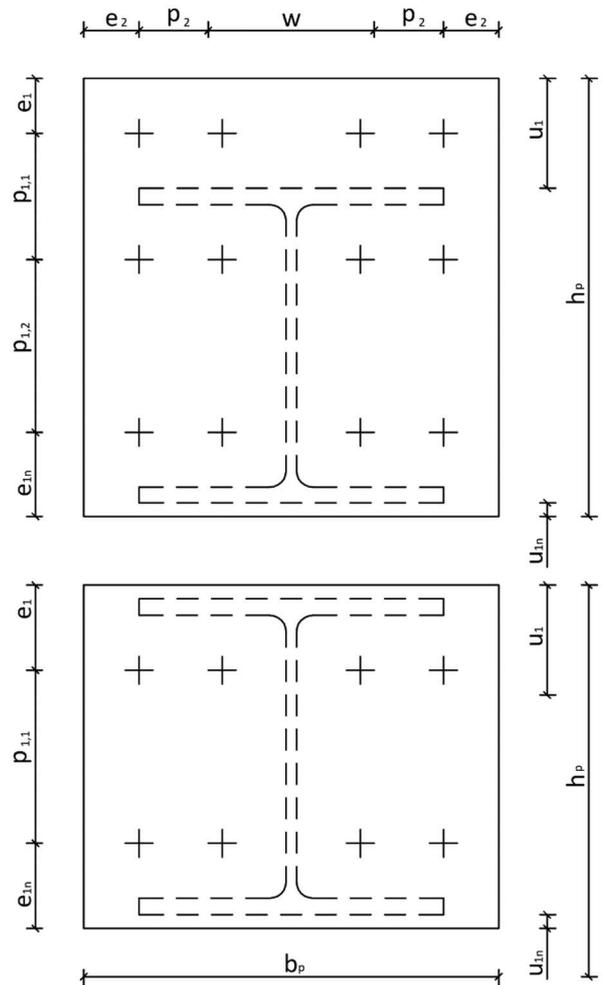
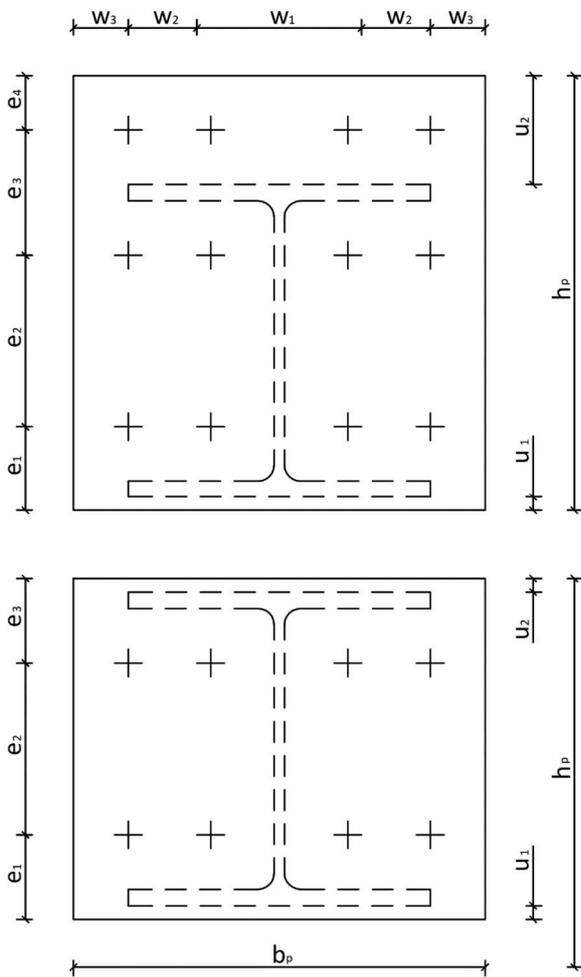


Abbildung 72: Bezeichnung der geometrischen Abmessungen gemäß Björn Schmidt

Abbildung 73: Bezeichnung der geometrischen Abmessungen gemäß DIN EN 1993-1-8 und Typisierte Verbindungen

Analog zu 4.1 wird auch für den vierreihigen Stoß die Bezeichnung der geometrischen Abmessung gemäß DIN EN 1993-1-8 [2] und Typisierte Verbindungen [1] und nicht nach Björn Schmidt [16] vorgenommen.

6.2 Allgemein

Nachfolgend soll jeweils für einen bündigen und einen überstehenden Stirnplattenstoß gemäß des von Dr.-Ing. Björn Schmidt beschriebenen Bemessungsverfahrens die Beanspruchbarkeit ermittelt werden.

Wie in 4.2 erläutert wird die Bezeichnung analog zu „Typisierte Anschlüsse im Stahlhochbau“ [1] gewählt.

Um im Kapitel 7 einen Vergleich der Bemessungsverfahren führen zu können, werden auch hier Anschlussgeometrien gemäß „Typisierte Anschlüsse im Stahlhochbau“ [1] verwendet.

Analog zu Kapitel 4.2 wird ein Stoß aus „Typisierte Anschlüsse im Stahlhochbau“ [1] mit zwei HEA 300 gewählt.

Es empfiehlt sich beim Durchlesen der verschiedenen Beispiele das jeweilige Flussdiagramm zur Hilfe zur nehmen. (siehe Seite 112ff)

6.3 Beispiel 3 – bündiger 4-reihiger Stoß

6.3.1 Anschlussgeometrie

Bei den gewählten gestoßenen Trägern handelt sich um einen HEA 300 S235 mit M24 Schrauben. (Ringbuch Nr. 459: IH 2.1 A 30 24) [1]

Nr.	Anschluss			Stirnplatte			Stirnplattengeometrie									Kehln.	
	Träger -profil	Typ	Schr. 10.9	t_p	b_p	h_p	e_1	$p_{1,1}$	$p_{1,2}$	e_{1n}	u_1	u_{1n}	w	p_2	e_2	a_w	a_f
455	HEA 300	IH2.1	M24	35	310	330	85	160	-	85	20	20	110	65	35	4	7

Tabelle 5: Beispiel 3: Anschlussgeometrien [mm]

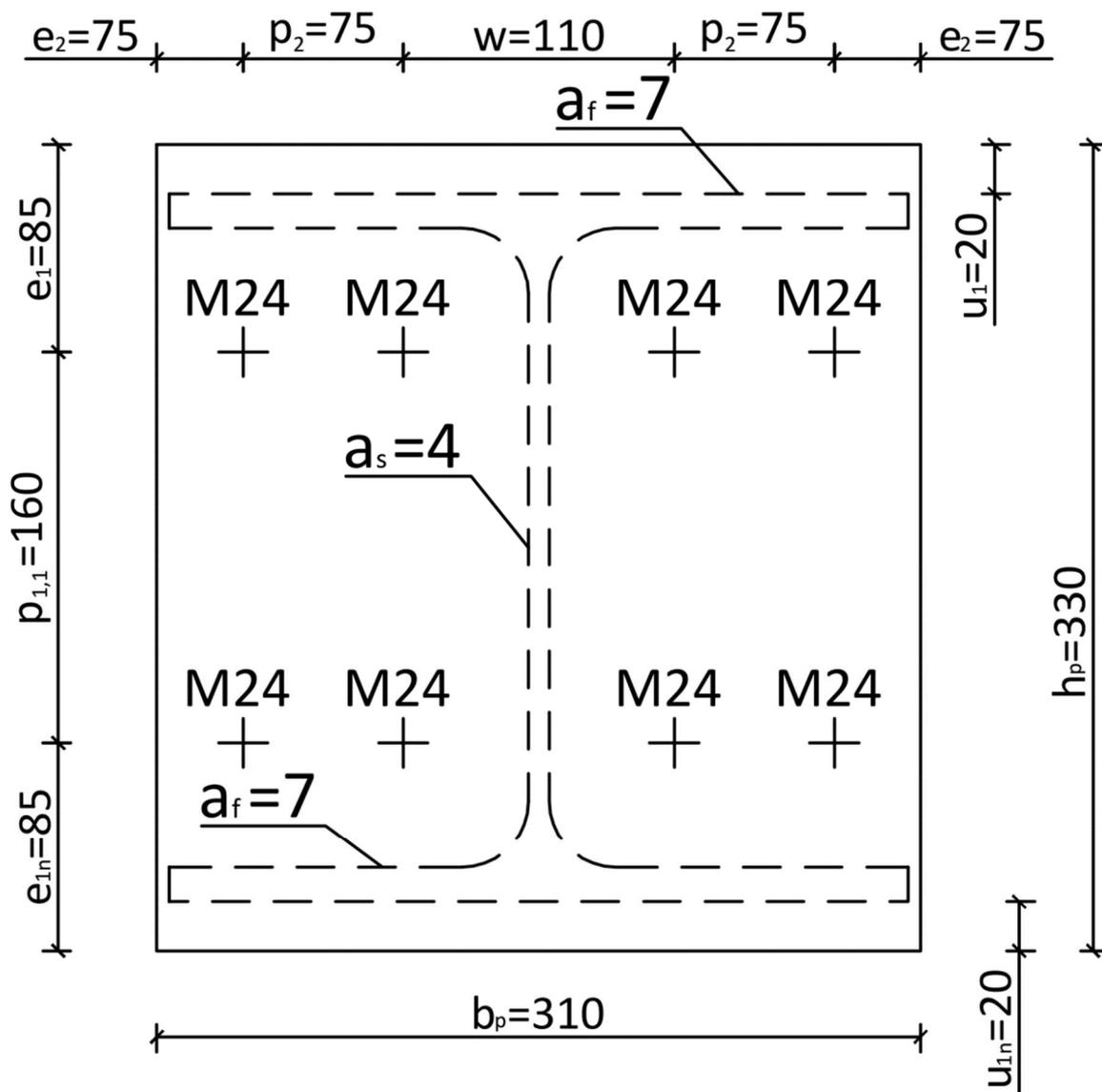


Abbildung 74: Beispiel 3: Anschlussgeometrien [mm]

6.3.2 Berechnung

Komponente 5: Stirnplatte mit Biegebeanspruchung

Fließlinienlänge in der Trägerkammer

Zunächst muss die effektive Fließlinienlänge ermittelt werden:

$$m = \frac{w}{2} - \frac{t_w}{2} - 0,8 \times a_w \times \sqrt{2}$$

$$m = \frac{110}{2} - \frac{8,5}{2} - 0,8 \times 4 \times \sqrt{2} = 46,2 \text{ mm}$$

$$m_2 = e_1 - u_1 - t_f - 0,8 \times a_f \times \sqrt{2} = 85 - 20 - 14 - 0,8 \times 7 \times \sqrt{2} = 43,1 \text{ mm}$$

$$\cos(\alpha) = \frac{1}{2} \times \frac{\sqrt{(m + p_2 + e_2) \times (3 \times m + 4 \times p_2 + 4 \times e_2)}}{m + p_2 + e_2} \times \sqrt{\frac{m}{m + p_2 + e_2}} \quad (\text{vgl. 5-21})$$

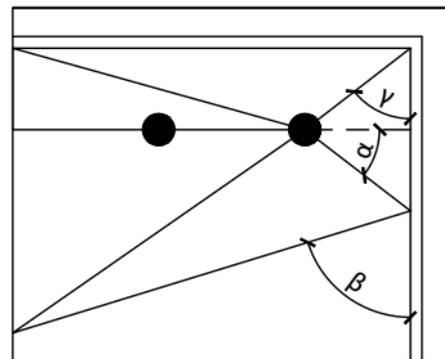
$$\cos(\alpha) = \frac{1}{2} \times \frac{\sqrt{(46,2 + 65 + 35) \times (3 \times 46,2 + 4 \times 65 + 4 \times 35)}}{46,2 + 65 + 35} \times \sqrt{\frac{46,2}{46,2 + 65 + 35}}$$

$$\cos(\alpha) = \frac{1}{2} \times \frac{280,6}{146,2} \times 0,562 = 0,539 \Rightarrow \alpha = 57,35^\circ$$

für: $n = e_2$

$$m_i = p_2$$

$$\sin(\beta) = \frac{\cos(\alpha)}{\sqrt{\frac{m}{m + p_2 + e_2}}} = \frac{0,539}{0,562} = 0,959 \Rightarrow \beta = 73,55^\circ$$



(vgl. 5-21 und 5-20)

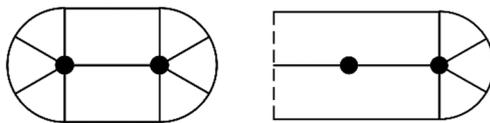
$$\sin(\gamma) = \sin\left(\arctan\left(\frac{m}{m_2}\right)\right) = \sin\left(\arctan\left(\frac{46,2}{43,1}\right)\right) = 0,73 \Rightarrow \gamma = 46,99^\circ \quad (\text{vgl. 5-22})$$

$$l_{eff.nc} = \frac{m}{2} \times \left(\begin{array}{l} \frac{m + 2 \times p_2 + 2 \times e_2}{m_2} + \frac{m_2}{m} + \frac{\sqrt{1 - \cos^2(\alpha)}}{\cos(\alpha)} \\ + \frac{m + 2 \times p_2 + 2 \times e_2}{m} \times \frac{\cos(\alpha)}{\sin^2(\beta)} \\ + \frac{\sqrt{m_2^2 + m^2}}{m \times \sin(\gamma)} \times \cos(\alpha) \\ + \frac{1}{\cos(\alpha)} + \frac{\sqrt{1 - \sin^2(\beta)}}{\sin(\beta)} \end{array} \right) \quad (\text{vgl. 5-19})$$

$$l_{eff.nc} = \frac{46,2}{2} \times \left(\begin{array}{l} \frac{46,2 + 2 \times 65 + 2 \times 35}{43,1} + \frac{43,1}{46,2} + \frac{\sqrt{1 - 0,539^2}}{0,539} \\ + \frac{46,2 + 2 \times 65 + 2 \times 35}{46,2} \times \frac{0,539}{0,959^2} \\ + \frac{\sqrt{43,1^2 + 46,2^2}}{46,2 \times 0,73} \times 0,539 \\ + \frac{1}{0,539} + \frac{\sqrt{1 - 0,959^2}}{0,959} \end{array} \right)$$

$$l_{eff.nc} = 23,1 \times \left(\begin{array}{l} 5,71 + 0,93 + 1,56 \\ + 3,12 \\ + 1,01 \\ + 1,85 + 0,30 \end{array} \right) = 23,1 \times 14,48 = 334,7 \text{ mm} \quad \text{maßgebend}$$

$$l_{eff.cp} = \min(2 \times \pi \times m + 2 \times p_2; \pi \times m + 2 \times (p_2 + e_2)) \quad (\text{vgl. 5-4})$$



$$l_{eff.cp} = \min(2 \times \pi \times 46,2 + 2 \times 65; \pi \times 46,2 + 2 \times (65 + 35))$$

$$l_{eff.cp} = \min(420; 345) = 345 \text{ mm} \quad \text{nicht maßgebend}$$

$$m_{pl,Platte,Rd} = 0,25 \times t_p^2 \times \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 \times 35^2 \times \frac{235}{1,0} = 71969 \frac{\text{Nmm}}{\text{mm}} \quad (\text{vgl. 2-9})$$

$$m_{pl,Trägerflansch,Rd} = 0,25 \times t_f^2 \times \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 \times 14^2 \times \frac{235}{1,0} = 11515 \frac{\text{Nmm}}{\text{mm}} \quad (\text{vgl. 2-9})$$

$$\rho_S = \frac{\frac{1}{(p_2 + m)^3} + \frac{1}{m^3}}{\frac{1}{m_2^3} + \frac{1}{m_2^3} + \frac{1}{(p_2 + m)^3} + \frac{1}{m^3}} = \frac{\frac{1}{(65 + 46,2)^3} + \frac{1}{46,2^3}}{\frac{1}{43,1^3} + \frac{1}{43,1^3} + \frac{1}{(65 + 46,2)^3} + \frac{1}{46,2^3}} = 0,303 \quad (\text{vgl. 5-32})$$

$$\rho_F = 1 - \rho_S = 1 - 0,303 = 0,697 \quad (\text{vgl. 5-31})$$

$$\rho_{Fi} = \frac{\frac{w}{2} + \frac{p_2}{2}}{\frac{b_b}{2}} = \frac{\frac{110}{2} + \frac{65}{2}}{\frac{300}{2}} = 0,58 \quad (\text{vgl. 5-42})$$

$$\rho_{Fa} = 1 - \rho_{Fi} = 1 - 0,58 = 0,42 \quad (\text{vgl. 5-43})$$

$$l_{eff,1} = \min(l_{eff,nc}; l_{eff,cp}) = \min(335; 345) = 335 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 3-38})$$

$$l_{eff,1,F} = \rho_F \times l_{eff,1} = 0,697 \times 334,7 = 233 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 5-33})$$

$$l_{eff,1,S} = \rho_S \times l_{eff,1} = 0,303 \times 334,7 = 101 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 5-34})$$

Modi 1/4:

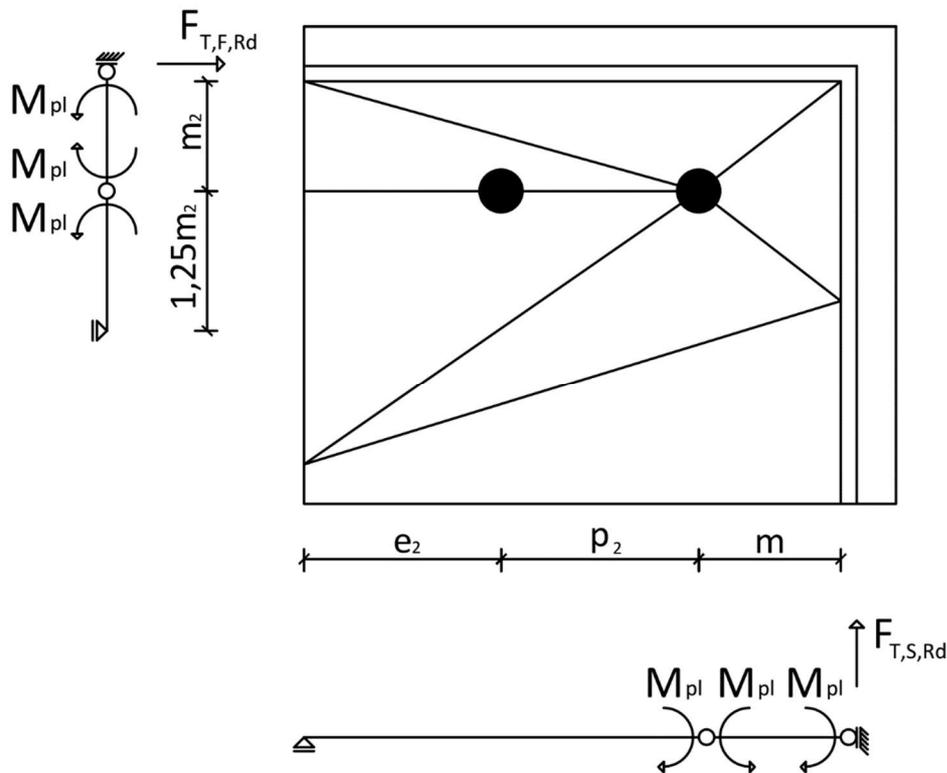


Abbildung 75: Zweiachsiges Versagensmodell für 4 Schrauben in einer Schraubenreihe (Modus 1) (vgl. Abbildung 63)

$$m_{pl,Rd} = \min\left(m_{pl,Platte,Rd}; \frac{m_{pl,Platte,Rd} + m_{pl,Flansch,Rd}}{2}\right) \quad (\text{vgl. 5-39})$$

$$m_{pl,Rd} = \min\left(71969; \frac{71969 + 11515}{2}\right) = \min(71969; 41742) = 41742 \frac{Nmm}{mm}$$

$$F_{T,1-4,F,Rd} = \frac{4 \times m_{pl,1,Rd} \times l_{eff,1,F}}{m_2} = \frac{4 \times 41742 \times 233}{43,1} = 9026344N = 903kN \quad (\text{vgl. 5-38})$$

$$F_{T,1,S,Rd} = \frac{4 \times m_{pl,Platte,Rd} \times l_{eff,1,S}}{m} = \frac{4 \times 71969 \times 101}{46,2} = 629339N = 629kN \quad (\text{vgl. 5-40})$$

$$F_{t,w,Rd}^* = l_{eff,1,S} \times t_w \times \frac{f_{y,w}}{\gamma_{M0}} = 101 \times 8,5 \times \frac{235}{1,0} = 201748N = 202kN \quad (\text{vgl. 3-47})$$

$$F_{T,1-4,Rd} = F_{T,1-4,F,Rd} + \min(F_{T,1,S,Rd}; F_{t,w,Rd}^*) = 903 + \min(629; 202) = 1105kN \quad (\text{vgl. 5-41})$$

Modi 2/5:

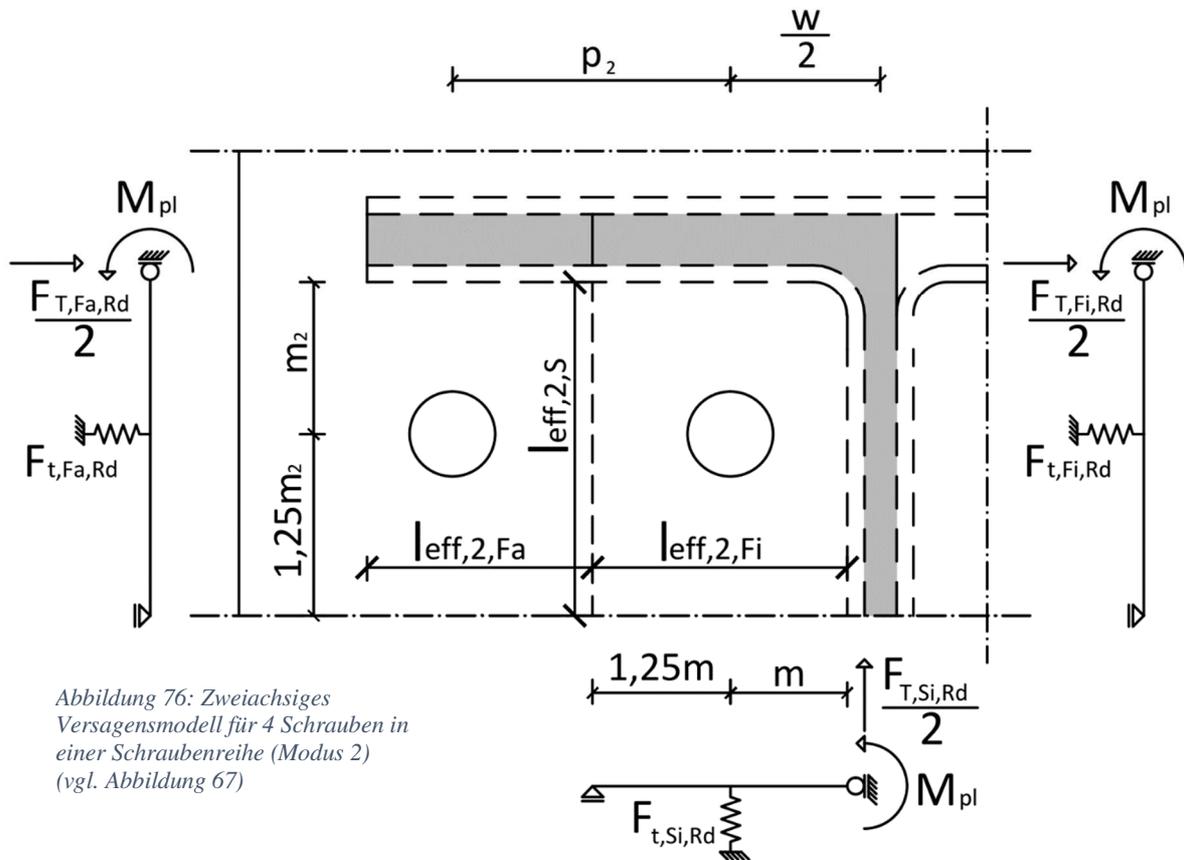


Abbildung 76: Zweiachsiges Versagensmodell für 4 Schrauben in einer Schraubenreihe (Modus 2) (vgl. Abbildung 67)

Die gemäß zu ermittelnden Gewichtungsfaktoren des Lastabtrags ermitteln sich zu:

$$l_{eff,2} = l_{eff,nc} = 335\text{mm} = l_{eff,1}$$

$$l_{eff,2,F} = l_{eff,1,F}$$

$$l_{eff,2,Fi} = \rho_{Fi} \times l_{eff,2,F} = 0,58 \times 233 = 135\text{mm} \quad (\text{vgl. 5-44})$$

$$l_{eff,2,Fa} = (1 - \rho_{Fi}) \times l_{eff,2,F} = (1 - 0,58) \times 229 = 98\text{mm} \quad (\text{vgl. 5-45})$$

$$m_{pl,Rd} = \min(m_{pl,Platte,Rd}; m_{pl,Flansch,Rd}) = \min(71969; 11515) = 11515 \frac{\text{Nmm}}{\text{mm}} \quad (\text{vgl. 5-53})$$

$$F_{T,2-5,Fa,Rd} = \frac{2 \times m_{pl,d} \times l_{eff,2,Fa} + 2 \times F_{t,Rd} \times 1,25 \times m_2}{m_2 + 1,25 \times m_2} \quad (\text{vgl. 5-54})$$

$$F_{T,2-5,Fa,Rd} = \frac{2 \times 11515 \times 98 + 2 \times 254,2 \times 1,25 \times 43,1 \times 10^3}{2,25 \times 43,1}$$

$$F_{T,2-5,Fa,Rd} = \frac{2256940 + 27390000}{96,975} = 305717\text{N} = 306\text{kN}$$

$$F_{T,2,Fi,Rd} = \frac{\left(\frac{2 \times m_{pl,Platte,Rd} \times (l_{eff,2,Fi} + l_{eff,2,S}) + 2 \times F_{t,Rd} \times 1,25 \times m}{m + 1,25 \times m} \right)}{(l_{eff,2,Fi} + l_{eff,2,S})} \times l_{eff,2,Fi} \quad (\text{vgl. 5-49})$$

$$F_{T,2,Fi,Rd} = \frac{2 \times 71969 \times (135 + 101) + 2 \times 254,2 \times 1,25 \times 46,2 \times 10^3}{2,25 \times 46,2} \times 135$$

$$F_{T,2,Fi,Rd} = \frac{34113306 + 29360100}{103,95} \times 135 = 349292N = 349kN$$

$$F_{T,2,Si,Rd} = \frac{\left(\frac{2 \times m_{pl,Platte,Rd} \times (l_{eff,2,Fi} + l_{eff,2,S}) + 2 \times F_{t,Rd} \times 1,25 \times m}{m + 1,25 \times m} \right)}{(l_{eff,2,Fi} + l_{eff,2,S})} \times l_{eff,2,S} \quad (\text{vgl. 5-48})$$

$$F_{T,2,Si,Rd} = \frac{2 \times 71969 \times (135 + 102) + 2 \times 254,2 \times 1,25 \times 46,2 \times 10^3}{2,25 \times 46,2} \times 101$$

$$F_{T,2,Si,Rd} = \frac{34113306 + 29360100}{103,95} \times 101 = 261322N = 261kN$$

$$F_{t,w,Rd} = l_{eff,2,S} \times t_w \times \frac{f_{y,w}}{\gamma_{M0}} = 101 \times 8,5 \times \frac{235}{1,0} = 201748N = 202kN \quad (\text{vgl. 5-50})$$

$$F_{T,2,S,Rd} = F_{T,2,Fi,Rd} + \min(F_{T,2,Si,Rd}; F_{t,w,Rd}) = 349 + \min(261; 202) = 551kN \quad (\text{vgl. 5-51})$$

$$F_{T,2-5,Rd} = F_{T,2-5,Fa,Rd} + F_{T,2,S,Rd} = 306 + 551 = 857kN \quad (\text{vgl. 5-55})$$

Modus 3

$$F_{t,3,i,Rd} = \sum F_{t,Rd} \quad (\text{vgl. 5-56})$$

$$F_{t,3,i,Rd} = 4 \times 254,2 = 1017kN$$

$$F_{t1,Rd} = F_{t2,Rd} = \min(F_{T,1-4,Rd}; F_{T,2-5,Rd}; F_{T,3,Rd}) = \min(1105; 857; 1017) = 857kN \quad (\text{vgl. 2-27})$$

Komponente 19: SchweißnähteModus 2 ist maßgebend gewesen:Flansch:

$$F_{w,F,Ed} = F_{T,2-5,Fa,Rd} + F_{T,2,Fi,Rd} = 305 + 349 = 654kN \quad (\text{vgl. 5-65})$$

$$l_{eff,w,F} = \min(2 \times b_b - t_w - 2 \times r; 2 \times l_{eff,1,F}) = \min(2 \times 30 - 0,85 - 2 \times 2,7; 2 \times 23,3) \quad (\text{vgl. 5-63})$$

$$l_{eff,w,F} = \min(53,8; \underline{46,6}) = 46,6cm$$

$$a_F \geq \frac{\beta_w \times \gamma_{M2} \times \sqrt{2} \times F_{w,F,Ed}}{f_u \times l_{eff,w,F}} \quad (\text{vgl. 5-62})$$

$$a_F \geq \frac{0,8 \times 1,25 \times \sqrt{2} \times 654}{36 \times 46,6} = 0,55cm = 5,5mm \leq a_{gewählt} = 7,0mm$$

$$F_{w,s,Ed} = \min(F_{T,2,Si,Rd}; F_{t,w,Rd}) = \min(261; 202) = 202kN \quad (\text{vgl. 5-60})$$

$$l_{eff,w,s} = 2 \times l_{eff,1} \times \rho_S = 2 \times 10,1 = 20,2cm \quad (\text{vgl. 5-58})$$

$$a_S \geq \frac{\beta_w \times \gamma_{M2} \times \sqrt{2} \times F_{w,s,Ed}}{f_u \times l_{eff,w,s}} \quad (\text{vgl. 5-57})$$

$$a_S \geq \frac{0,8 \times 1,25 \times \sqrt{2} \times 202}{36 \times 20,2} = 0,39cm = 3,9mm \leq a_{gewählt} = 4,0mm$$

maßgebende Komponente:

$$h_1 = h_p - e_1 - u_{1n} - \frac{t_f}{2} = 330 - 85 - 20 - \frac{14}{2} = 218 \text{ mm}$$

$$h_2 = e_{1n} - u_{1n} - \frac{t_f}{2} = 85 - 20 - \frac{14}{2} = 58 \text{ mm}$$

Annahme: hier keine Querkraftinteraktion, sodass $M_{c,Rd} = M_{y,Rd}$

$$F_{c,fb,Rd} = \frac{M_{c,Rd}}{h - t_f} = \frac{325,1}{0,29 - 0,014} = 1177,9 \text{ kN} \quad (\text{vgl. 2-29})$$

$$F_{t1,Rd} + F_{t2,Rd} \times \frac{h_2}{h_1} = 857 + 857 \times \frac{58}{218} = 1085 \text{ kN} < 1177,9 \text{ kN} = F_{c,fb,Rd}$$

→ Zugkomponenten maßgebend

elastische Schraubenkraftverteilung:

$$M_{j,Rd} = F_{t1,Rd} \times h_1 + \frac{F_{t2,Rd}}{h_1} \times h_2^2 = 857 \times 0,218 + 857 \times \frac{0,058^2}{0,218} = 200,1 \text{ kNm} \quad (\text{vgl. 2-49})$$

zum Vergleich:

Typisierte Verbindungen [1]

$$M_{j,Rd} = 181,9 \text{ kNm}$$

Versagen des Stegs auf Zug

Kommentar:

Dass die in diesem Beispiel ermittelte Biegebeanspruchbarkeit die in den Typisierten Anschlüssen angegebene Biegebeanspruchbarkeit übersteigt ist auf die genauere Berücksichtigung der Stegtragfähigkeit zurückzuführen. (vgl. 3.8 Exkurs: Gewichteter Lastabtrag und 5.2.5.2 kombiniertes Versagen von Platte und Schraube – Modus 2)

6.4 Beispiel 4 – überstehender 4-reihiger Stoß

6.4.1 Anschlussgeometrie

Bei den gewählten gestoßenen Trägern handelt sich um einen HEA 300 S235 mit M20 Schrauben. (Ringbuch Nr. 455: IH 4.1 A 30 20) [1]

Nr.	Anschluss			Stirnplatte			Stirnplattengeometrie									Kehln.	
	Träger -profil	Typ	Schr. 10.9	t_p	b_p	h_p	e_1	$p_{1,1}$	$p_{1,2}$	e_{1n}	u_1	u_{1n}	w	p_2	e_2	a_w	a_f
465	HEA 300	IH4.1	M20	25	300	380	30	95	180	75	70	20	90	70	35	5	10

Tabelle 6: Beispiel 4: Anschlussgeometrien [mm]

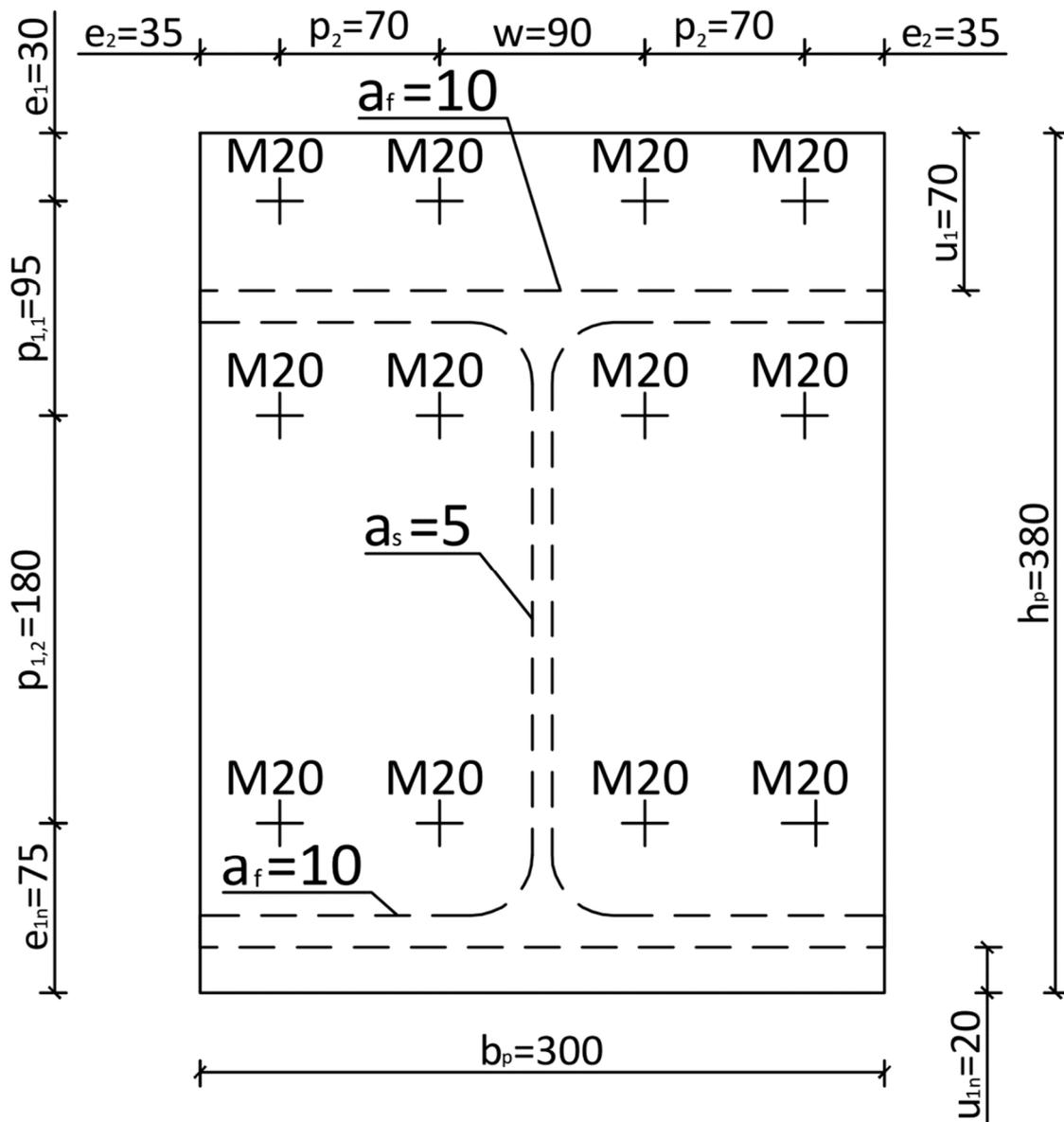


Abbildung 77: Beispiel 4: Anschlussgeometrien [mm]

6.4.2 Berechnung

Komponente 5: Stirnplatte mit Biegebeanspruchung

Fließlinienlänge in der Trägerkammer

Zunächst muss die effektive Fließlinienlänge ermittelt werden:

$$m = \frac{w}{2} - \frac{t_w}{2} - 0,8 \times a_w \times \sqrt{2}$$

$$m = \frac{90}{2} - \frac{8,5}{2} - 0,8 \times 5 \times \sqrt{2} = 35,1 \text{ mm}$$

$$m_2 = p_{1,1} + e_1 - u_1 - t_f - 0,8 \times a_f \times \sqrt{2}$$

$$m_2 = 95 + 30 - 70 - 14 - 0,8 \times 10 \times \sqrt{2} = 29,7 \text{ mm}$$

$$\cos(\alpha) = \frac{1}{2} \times \frac{\sqrt{(m + p_2 + e_2) \times (3 \times m + 4 \times p_2 + 4 \times e_2)}}{m + p_2 + e_2} \times \sqrt{\frac{m}{m + p_2 + e_2}} \quad (\text{vgl. 5-21})$$

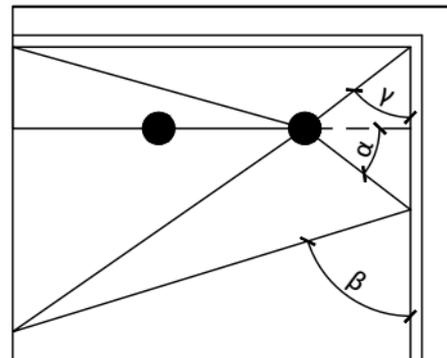
$$\cos(\alpha) = \frac{1}{2} \times \frac{\sqrt{(35,1 + 70 + 35) \times (3 \times 35,1 + 4 \times 70 + 4 \times 35)}}{35,1 + 70 + 35} \times \sqrt{\frac{35,1}{35,1 + 70 + 35}}$$

$$\cos(\alpha) = \frac{1}{2} \times \frac{271,3}{140,1} \times 0,501 = 0,485 \Rightarrow \alpha = 61,0^\circ$$

für: $n = e_2$

$$m_i = p_2$$

$$\sin(\beta) = \frac{\cos(\alpha)}{\sqrt{\frac{m}{m + p_2 + e_2}}} = \frac{0,485}{0,501} = 0,968 \Rightarrow \beta = 75,48^\circ$$



(vgl. 5-21 und 5-20)

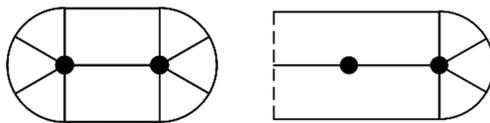
$$\sin(\gamma) = \sin\left(\arctan\left(\frac{m}{m_2}\right)\right) = \sin\left(\arctan\left(\frac{35,1}{29,7}\right)\right) = 0,76 \Rightarrow \gamma = 49,76^\circ \quad (\text{vgl. 5-22})$$

$$l_{eff,nc} = \frac{35,1}{2} \times \left(\begin{array}{l} \frac{m + 2 \times p_2 + 2 \times e_2}{m_2} + \frac{m_2}{m} + \frac{\sqrt{1 - \cos^2(\alpha)}}{\cos(\alpha)} \\ + \frac{m + 2 \times p_2 + 2 \times e_2}{m} \times \frac{\cos(\alpha)}{\sin^2(\beta)} \\ + \frac{\sqrt{m_2^2 + m^2}}{m \times \sin(\gamma)} \times \cos(\alpha) \\ + \frac{1}{\cos(\alpha)} + \frac{\sqrt{1 - \sin^2(\beta)}}{\sin(\beta)} \end{array} \right) \quad (\text{vgl. 5-19})$$

$$l_{eff,nc} = \frac{35,1}{2} \times \left(\begin{array}{l} \frac{35,1 + 2 \times 70 + 2 \times 35}{29,7} + \frac{29,7}{35,1} + \frac{\sqrt{1 - 0,485^2}}{0,485} \\ + \frac{35,1 + 2 \times 70 + 2 \times 35}{35,1} \times \frac{0,485}{0,968^2} \\ + \frac{\sqrt{29,7^2 + 35,1^2}}{35,1 \times 0,76} \times 0,485 \\ + \frac{1}{0,485} + \frac{\sqrt{1 - 0,968^2}}{0,968} \end{array} \right)$$

$$l_{eff,nc} = 17,55 \times \left(\begin{array}{l} 8,25 + 0,85 + 1,80 \\ + 3,61 \\ + 0,84 \\ + 2,06 + 0,26 \end{array} \right) = 17,66 \times 17,57 = 310,3 \text{ mm} \quad \text{maßgebend}$$

$$l_{eff,cp} = \min(2 \times \pi \times m + 2 \times p_2; \pi \times m + 2 \times (p_2 + e_2)) \quad (\text{vgl. 5-4})$$



$$l_{eff,cp} = \min(2 \times \pi \times 35,1 + 2 \times 70; \pi \times 35,1 + 2 \times (70 + 35))$$

$$l_{eff,cp} = \min(361; 320) = 320 \text{ mm} \quad \text{nicht maßgebend}$$

$$m_{pl,Platte,Rd} = 0,25 \times t_p^2 \times \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 \times 25^2 \times \frac{235}{1,0} = 36719 \frac{\text{Nmm}}{\text{mm}} \quad (\text{vgl. 2-9})$$

Die gemäß 5.2.5.1 zu ermittelnden Gewichtungsfaktoren des Lastabtrags ermitteln sich zu:

$$\rho_s = \frac{\frac{1}{(p_2 + m)^3} + \frac{1}{m^3}}{\frac{1}{m_2^3} + \frac{1}{m_2^3} + \frac{1}{(p_2 + m)^3} + \frac{1}{m^3}} = \frac{\frac{1}{(70 + 35,1)^3} + \frac{1}{35,1^3}}{\frac{1}{29,7^3} + \frac{1}{29,7^3} + \frac{1}{(70 + 35,1)^3} + \frac{1}{35,1^3}} = 0,239 \quad (\text{vgl. 5-32})$$

$$\rho_F = 1 - \rho_S = 1 - 0,239 = 0,761 \quad (\text{vgl. 5-31})$$

$$\rho_{Fi} = \frac{\frac{w}{2} + \frac{p_2}{2}}{\frac{b_b}{2}} = \frac{\frac{90}{2} + \frac{70}{2}}{\frac{300}{2}} = 0,53 \quad (\text{vgl. 5-42})$$

$$\rho_{Fa} = 1 - \rho_{Fi} = 1 - 0,53 = 0,47 \quad (\text{vgl. 5-43})$$

Modus 1:

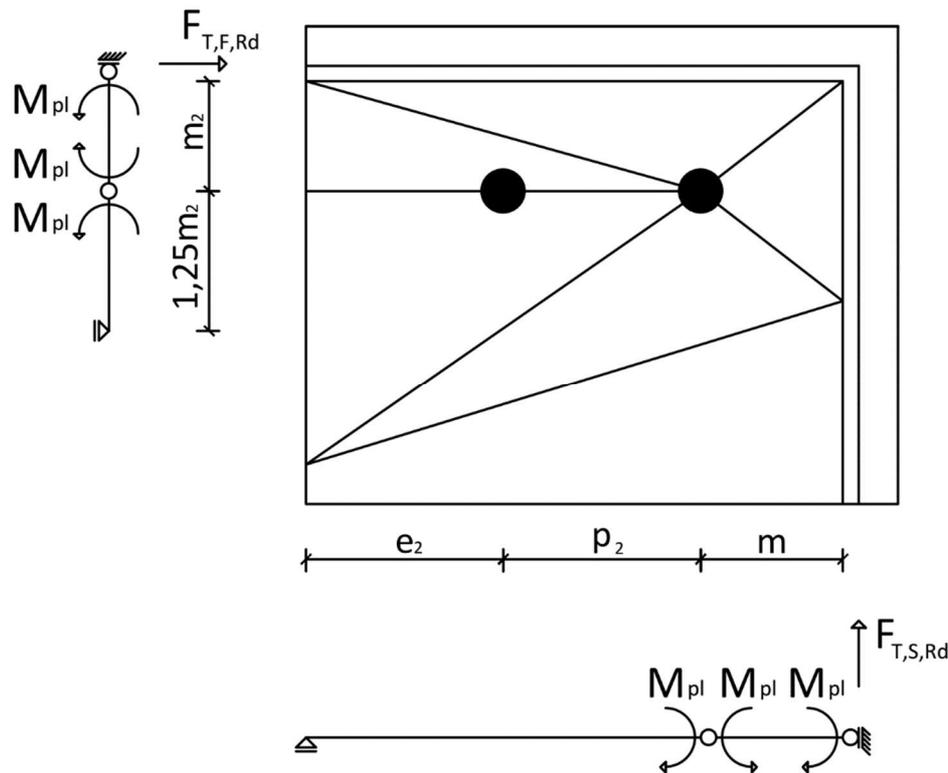


Abbildung 78: Zweiachsiges Versagensmodell für 4 Schrauben in einer Schraubenreihe (Modus 1) (vgl. Abbildung 63)

$$l_{eff,1} = \min(l_{eff,nc}; l_{eff,cp}) = \min(310,3; 320) = 310,3 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 3-38})$$

$$l_{eff,1,F} = \rho_F \times l_{eff,1} = 0,761 \times 310,3 = 236 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 5-33})$$

$$l_{eff,1,S} = \rho_S \times l_{eff,1} = 0,239 \times 310,3 = 75 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 5-34})$$

$$F_{T,1,F,Rd} = \frac{4 \times m_{pl,Platte,Rd} \times l_{eff,1,F}}{m_2} = \frac{4 \times 36719 \times 236}{29,7} = 1167095 \text{ N} = 1167 \text{ kN} \quad (\text{vgl. 5-35})$$

$$F_{T,1,S,Rd} = \frac{4 \times m_{pl,Platte,Rd} \times l_{eff,1,S}}{m} = \frac{4 \times 36719 \times 75}{35,1} = 313838 \text{ N} = 314 \text{ kN} \quad (\text{vgl. 5-36})$$

$$F_{T,2, Fa, Rd} = \frac{2 \times 36719 \times 110 + 2 \times 176,4 \times 1,25 \times 29,7 \times 10^3}{2,25 \times 29,7}$$

$$F_{T,2, Fa, Rd} = \frac{8078180 + 13097700}{66,83} = 316862 N = 317 kN$$

$$F_{T,2, Fi, Rd} = \frac{2 \times m_{pl, Platte, Rd} \times (l_{eff, 2, Fi} + l_{eff, 2, S}) + 2 \times F_{t, Rd} \times 1,25 \times m}{2,25 \times m} \times \frac{l_{eff, 2, Fi}}{(l_{eff, 2, Fi} + l_{eff, 2, S})} \quad (\text{vgl. 5-49})$$

$$F_{T,2, Fi, Rd} = \frac{2 \times 36719 \times (126 + 75) + 2 \times 176,4 \times 1,25 \times 35,1 \times 10^3}{2,25 \times 35,1} \times \frac{126}{126 + 75}$$

$$F_{T,2, Fi, Rd} = \frac{14614162 + 13097700}{78,98} \times 0,623 = 238536 N = 239 kN$$

$$F_{T,2, Si, Rd} = \frac{2 \times m_{pl, Platte, Rd} \times (l_{eff, 2, Fi} + l_{eff, 2, S}) + 2 \times F_{t, Rd} \times 1,25 \times m}{2,25 \times m} \times \frac{l_{eff, 2, S}}{(l_{eff, 2, Fi} + l_{eff, 2, S})} \quad (\text{vgl. 5-48})$$

$$F_{T,2, Si, Rd} = \frac{2 \times 36719 \times (126 + 75) + 2 \times 176,4 \times 1,25 \times 35,1 \times 10^3}{2,25 \times 35,1} \times \frac{75}{126 + 75}$$

$$F_{T,2, Si, Rd} = \frac{14761038 + 15479100}{78,98} \times 0,373 = 142816 N = 143 kN$$

$$F_{t,w, Rd} = l_{eff, 2, S} \times t_w \times \frac{f_{y,w}}{\gamma_{M0}} = 75 \times 8,5 \times \frac{235}{1,0} = 149813 N = 150 kN \quad (\text{vgl. 5-50})$$

$$F_{T,2, S, Rd} = F_{t,2, Fi, Rd} + \min(F_{T,2, Si, Rd}; F_{t,w, Rd}) = 239 + \min(143; 150) = 382 kN \quad (\text{vgl. 5-51})$$

$$F_{T,2, Rd} = F_{t,2, Fa, Rd} + F_{T,2, S, Rd} = 317 + 382 = 699 kN \quad (\text{vgl. 5-52})$$

Modus 3

$$F_{T,3, Rd} = \sum F_{t, Rd} \quad (\text{vgl. 5-56})$$

$$F_{T,3, Rd} = 4 \times 176,4 = 705,6 kN$$

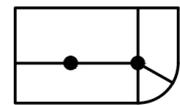
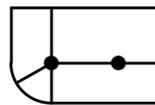
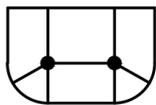
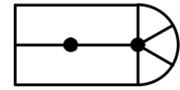
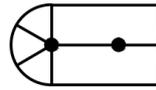
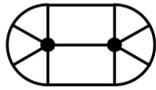
$$F_{t2, Rd} = F_{t, ep, Rd} = \min(F_{T,1-4, Rd}; F_{T,2-5, Rd}; F_{T,3, Rd}) = \min(1310; \underline{699}; 706) = 699 kN \quad (\text{vgl. 2-27})$$

Stirnplattenüberstand

$$m_x = u_1 - e_1 - 0,8 \times a_f \times \sqrt{2} = 70 - 30 - 0,8 \times 10 \times \sqrt{2} = 28,7$$

$$l_{eff,cp} = \min \left(\begin{array}{l} 2 \times \pi \times m_x + 2 \times p_2; \pi \times m_x + 2 \times (p_2 + 0,5 \times w); \pi \times m_x + 2 \times (p_2 + e_2); \\ \pi \times m_x + p_2 + 2 \times e_1; 0,5 \times \pi \times m_x + p_2 + 0,5 \times w + e_1; 0,5 \times \pi \times m_x + p_2 + e_1 + e_2 \end{array} \right)$$

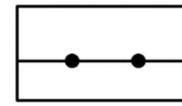
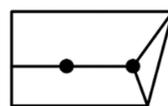
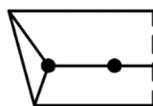
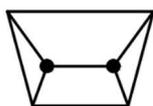
(vgl. 5-1)



$$l_{eff,cp} = \min \left(\begin{array}{l} 2 \times \pi \times 28,7 + 2 \times 70; \pi \times 28,7 + 2 \times (70 + 0,5 \times 90); \pi \times 28,7 + 2 \times (70 + 35); \\ \pi \times 28,7 + 70 + 2 \times 30; 0,5 \times \pi \times 28,7 + 70 + 0,5 \times 90 + 30; 0,5 \times \pi \times 28,7 + 70 + 30 + 35 \end{array} \right)$$

$$l_{eff,cp} = \min \left(\begin{array}{l} 320; 320; 300; \\ 220; 190; 180 \end{array} \right)$$

$$l_{eff,nc} = \min \left(\begin{array}{l} 4 \times m_x + 1,25 \times e_1 + p_2; \\ 2 \times m_x + 0,625 \times e_1 + p_2 + 0,5 \times w; \\ 2 \times m_x + 0,625 \times e_1 + p_2 + e_2; \\ \frac{b_p}{2}; \frac{b_b}{2} + \sqrt{2} \times 0,8 \times a_f \end{array} \right) \quad \text{(vgl. 5-2 und 5-3)}$$



$$l_{eff,nc} = \min \left(\begin{array}{l} 4 \times 28,7 + 1,25 \times 30 + 70; \\ 2 \times 28,7 + 0,625 \times 30 + 70 + 0,5 \times 90; \\ 2 \times 28,7 + 0,625 \times 30 + 70 + 35; \\ \frac{300}{2}; \frac{300}{2} + \sqrt{2} \times 0,8 \times 10 \end{array} \right)$$

$$l_{eff,nc} = \min(222; 191; 181; 150; 161)$$

$$l_{eff,l} = \min(l_{eff,nc}; l_{eff,cp}) = \min(150; 180) = 150 \text{ mm}$$

$$m_{pl,Rd} = m_{pl,Platte,Rd} = 36719 \frac{Nmm}{mm}$$

$$L_b = x + 2 \times t_p = 22,5 + 2 \times 25 = 72,5 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 2-5})$$

$$L_b^* = \frac{8,8 \times m_x^3 \times A_s \times n_b}{\sum l_{\text{eff},1} \times t_p^3} = \frac{8,8 \times 28,7^3 \times 245 \times 2}{150 \times 25^3} = 43,5 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 2-26})$$

$$L_b > L_b^* \quad \rightarrow \quad \text{Es treten keine Abstützkräfte auf}$$

$$F_{T,1-2,Rd} = \frac{2 \times m_{pl,Platte,d} \times l_{\text{eff},1}}{m_x} \quad (\text{vgl. 5-28})$$

$$F_{T,1-2,Rd} = \frac{2 \times 36719 \times 150}{28,7} = 383822 \text{ N} = 384 \text{ kN}$$

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 4 \times 176,4 = 705,6 \text{ kN} \quad (\text{vgl. 5-56})$$

$$F_{t1,Rd} = F_{t,ep,Rd} = \min(F_{T,1-2,Rd}; F_{T,3,Rd}) \quad (\text{vgl. 5-29})$$

$$F_{t1,Rd} = F_{t,ep,Rd} = \min(384; 705,6) = 384 \text{ kN}$$

Komponente 19: Schweißnähte

Modus 2 ist maßgebend gewesen

Flanschschweißnaht:

$$l_{\text{eff},w,F} = \min(b_b - t_w - 2 \times r; l_{\text{eff},1,F,Trägerkammer}) + \min(b_b; 2 \times l_{\text{eff},1,Stirnplattenüberst.}) \quad (\text{vgl. 5-63})$$

$$l_{\text{eff},w,F} = \min(30 - 0,85 - 2 \times 2,7; 23,6) + \min(30; 2 \times 15) = 53,6 \text{ cm}$$

$$F_{w,F,Ed} = F_{t1,Rd} + F_{T,2,fa,Rd} + F_{T,2,fi,Rd} = 384 + 317 + 239 = 940 \text{ kN} \quad (\text{vgl. 5-69})$$

$$a_F \geq \frac{\beta_w \times \gamma_{M2} \times \sqrt{2} \times F_{w,F,Ed}}{f_u \times l_{\text{eff},w,F}} \quad (\text{vgl. 5-62})$$

$$a_F \geq \frac{0,8 \times 1,25 \times \sqrt{2} \times 940}{36 \times 53,6} = 0,69 \text{ cm} = 6,9 \text{ mm} \leq a_{\text{gewählt}} = 10,0 \text{ mm}$$

Stegschweißnaht:

$$l_{\text{eff},w,s} = 2 \times l_{\text{eff},1} \times \rho_S = 2 \times 7,5 = 15 \text{ cm} \quad (\text{vgl. 5-58})$$

$$F_{w,s,Ed} = \min(F_{T,2,si,Rd}; F_{t,w,Rd}) = \min(143; 150) = 143 \text{ kN} \quad (\text{vgl. 5-60})$$

$$a_s \geq \frac{\beta_w \times \gamma_{M2} \times \sqrt{2} \times F_{w,s,Ed}}{f_u \times l_{eff,w,s}} \quad (\text{vgl. 5-57})$$

$$a_s \geq \frac{0,8 \times 1,25 \times \sqrt{2} \times 143}{36 \times 15} = 0,37 \text{ cm} = 3,7 \text{ mm} \leq a_{\text{gewählt}} = 5,0 \text{ mm}$$

Anfangsrotationssteifigkeit

$$k_{10,1} = 3,2 \times \frac{A_s}{L_b} = 3,2 \times \frac{245}{72,5} = 10,81 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 5-72})$$

$$k_{5,1} = \frac{0,9 \times l_{eff,1} \times t_p^3}{m_x^3} = \frac{0,9 \times 150 \times 25^3}{28,7^3} = 89,23 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 5-73})$$

$$k_{eff,1} = \frac{1}{\frac{1}{k_{10,1}} + \frac{2}{k_{5,1}}} = \frac{1}{\frac{1}{10,81} + \frac{2}{89,23}} = 8,70 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 5-71})$$

$$k_{10,2} = 1,6 \times \frac{A_s}{L_b} = 1,6 \times \frac{245}{12,5} = 5,41 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 5-75})$$

$$k_{5,2,F} = \frac{0,9 \times l_{eff,F} \times t_p^3}{m_2^3} = \frac{0,9 \times 236 \times 25^3}{29,7^3} = 126,68 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 5-76})$$

$$k_{eff,2,F} = \frac{1}{\frac{1}{k_{10,2}} + \frac{2}{k_{5,2,F}}} = \frac{1}{\frac{1}{5,41} + \frac{2}{126,68}} = 4,98 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 5-74})$$

$$k_{5,2,S} = \frac{0,9 \times l_{eff,S} \times t_p^3}{m^3} = \frac{0,9 \times 75 \times 25^3}{35,1^3} = 24,34 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 5-78})$$

$$k_{eff,2,S} = \frac{1}{\frac{1}{k_{10,2}} + \frac{2}{k_{5,2,S}}} = \frac{1}{\frac{1}{5,41} + \frac{2}{24,34}} = 3,75 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 5-77})$$

$$k_{eff,2} = k_{eff,2,S} + k_{eff,2,F} = 4,98 + 3,75 = 8,73 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 5-79})$$

$$h_1 = h_p - e_1 - u_{1n} - \frac{t_f}{2} = 380 - 30 - 20 - \frac{14}{2} = 323 \text{ mm}$$

$$h_2 = h_p - e_1 - p_{1,1} - u_{1n} - \frac{t_f}{2} = 380 - 30 - 95 - 20 - \frac{14}{2} = 228 \text{ mm}$$

$$z_{eq} = \frac{k_{eff,1} \times h_1^2 + k_{eff,2} \times h_2^2}{k_{eff,1} \times h_1 + k_{eff,2} \times h_2} = \frac{8,73 \times 323^2 + 8,73 \times 228^2}{8,73 \times 323 + 8,73 \times 228} = 283,7 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 5-80})$$

$$k_{eq} = \frac{k_{eff,1} \times h_1 + k_{eff,2} \times h_2}{z_{eq}} = \frac{8,73 \times 323 + 8,73 \times 228}{283,7} = 16,96 \text{ mm} \quad (\text{vgl. 5-81})$$

$$S_{j,ini} = E \times z_{eq}^2 \times k_{eq} = 210000 \times 283,7^2 \times 16,96 = 2,867 \times 10^{11} \text{ Nm} = 286,7 \text{ MNm} \quad (\text{vgl. 5-82})$$

$$S_{j,ini} \geq 8 \times \frac{E \times I_b}{L_B} \quad (\text{vgl. 2-69})$$

$$2,867 \times 10^{11} \geq \frac{8 \times 210000 \times 182630000}{L_B}$$

$$L_B \geq \frac{8 \times 210000 \times 182630000}{2,867 \times 10^{11}} = 1070 \text{ mm} = 1,07 \text{ m}$$

Für $L_B \geq 1,07 \text{ m} \rightarrow$ Klasse 1 - starr

zum Vergleich:

Typisierte Verbindungen [1]

$$S_{j,i} = 279,19 \text{ MNm}$$

Kommentar:

In den Typisierten Verbindungen von 2002 [18] weicht die Berechnung der Plattensteifigkeit von der DIN EN 1993-1-8 ab.

Die Komponente 7 (Stirnplatte auf Biegung) aus den Typisierten Verbindungen von 2002 [19] entspricht der Komponente 5 (Stirnblech mit Biegebeanspruchung) aus der DIN EN 1993-1-8 [2] und berechnet sich mit einem anderen Faktor:

$$k_7 = \frac{0,85 \times l_{eff,1} \times t_p^3}{m_x^3} \quad \text{anstelle von:} \quad k_5 = \frac{0,9 \times l_{eff,1} \times t_p^3}{m_x^3}$$

Komponente 7: Trägerflansch mit Druckbeanspruchung

Annahme: hier keine Querkraftinteraktion, sodass $M_{c,Rd} = \gamma_{Rd}$

$$F_{c,fb,Rd} = \frac{M_{c,Rd}}{h - t_f} = \frac{325,1}{0,29 - 0,014} = 1177,9kN \quad (\text{vgl. 2-29})$$

Biegetragfähigkeit

$$F_{t1,Rd} + F_{t2,Rd} \leq F_{c,fb,Rd} \quad (\text{vgl. 2-60})$$

$$384 + 699 \leq 1178 \Leftrightarrow 1083 \leq 1178 \quad \rightarrow \quad \text{Zugkomponenten maßgebend}$$

$$M_{j,Rd} = F_{t1,Rd} \times h_1 + F_{t2,Rd} \times h_2 = 384 \times 0,323 + 699 \times 0,228 = 283kNm \quad (\text{vgl. 2-59})$$

zum Vergleich:

Typisierte Verbindungen [1]

$$M_{j,Rd} = 285,0kNm$$

Versagen des Trägerflansch und -steg auf Druck

7 Auswertung der Beispiele

7.1 Einfluss der Komponenten auf die Biegetragfähigkeit

Nachfolgend soll Stichprobenartig geprüft werden, welchen Einfluss bestimmte Änderungen an der Konstruktion auf die Biegetragfähigkeit haben.

Plattendicke

In Diagramm 5 ist dargestellt wie sich die Biegetragfähigkeit der typisierten Verbindung Nr.497 (HEA 400 , 4-reihig , oben überstehend , M24) bei einer Veränderung der Stirnplattendicke verhält.

Zum einen fällt auf, dass für verschiedene Geometrien eine Verstärkung der Stirnplattendicke unterschiedliche Zunahmen der Tragfähigkeit zur Folge hat.

Auffällig ist die Tragfähigkeitsreduzierung, wenn die Stirnplattendicke von 29 auf 30 Millimeter (oder für baupraktische Dicken: von 25 auf 30 Millimeter) verstärkt wird. Daraus lässt sich schließen, dass wenn für eine bestimmte Stirnplattendicke keine Abstützkräfte im Stirnplattenüberstand auftreten, eine Reduzierung der Plattendicke sinnvoll sein kann.

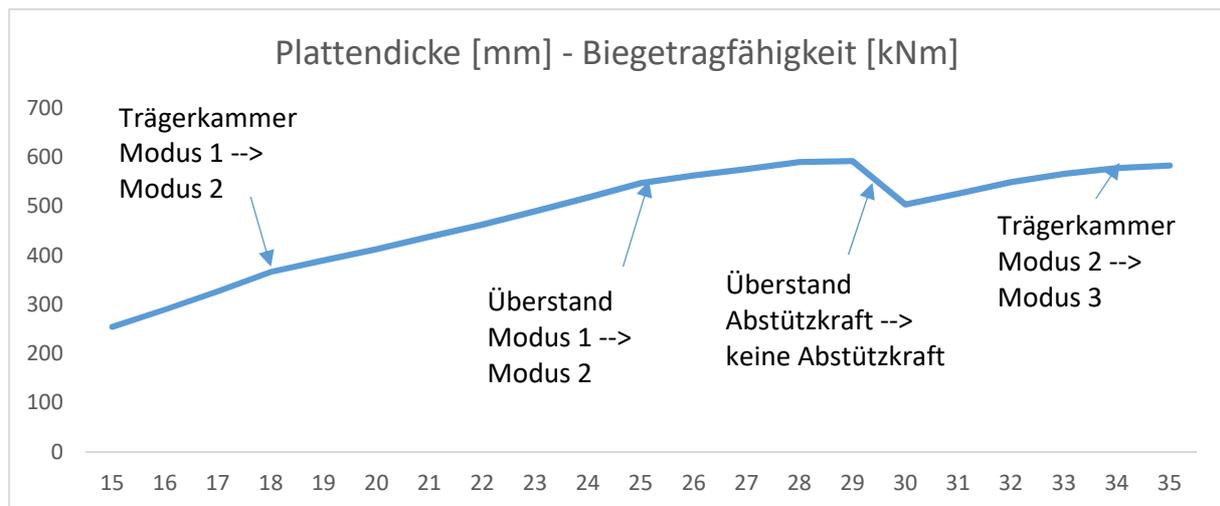


Diagramm 5: Abhängigkeit der Biegetragfähigkeit von der Stirnplattendicke (Stoß ähnlich: Typisierte Verbindung Nr.497 HEA 400 IH4.1 M24)

Schraubendurchmesser

In Diagramm 6 ist der Einfluss des Schraubendurchmessers auf die Biegetragfähigkeit der typisierten Verbindung Nr.497 (HEA 400 , 4-reihig , oben überstehend , $t_p=30\text{mm}$) dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass die Änderung des Schraubennennendurchmessers von 20 auf 24 mm keine Verbesserung bringt. Begründet werden kann dies über die sich proportional zu den Durchmessern verhaltenen Abstände der Schrauben zum Flansch und zum Steg. Wenn bereits Abstützkräfte auftreten hat ein größerer Hebelarm (m) einen negativen Einfluss auf die Biegetragfähigkeit der Platte.

Das gleiche kann auch für die Schraubendurchmesser größer als M27 beobachtet werden, welche die Biegetragfähigkeit sogar verringern.

Dass der Stoß mit einer M27-Schraube eine höhere Biegetragfähigkeit als der M24-Stoß aufweist ist auf den sich vergrößernden Hebelarm m und der dadurch im Stirnplattenüberstand auftretenden Abstützkraft zurückzuführen.

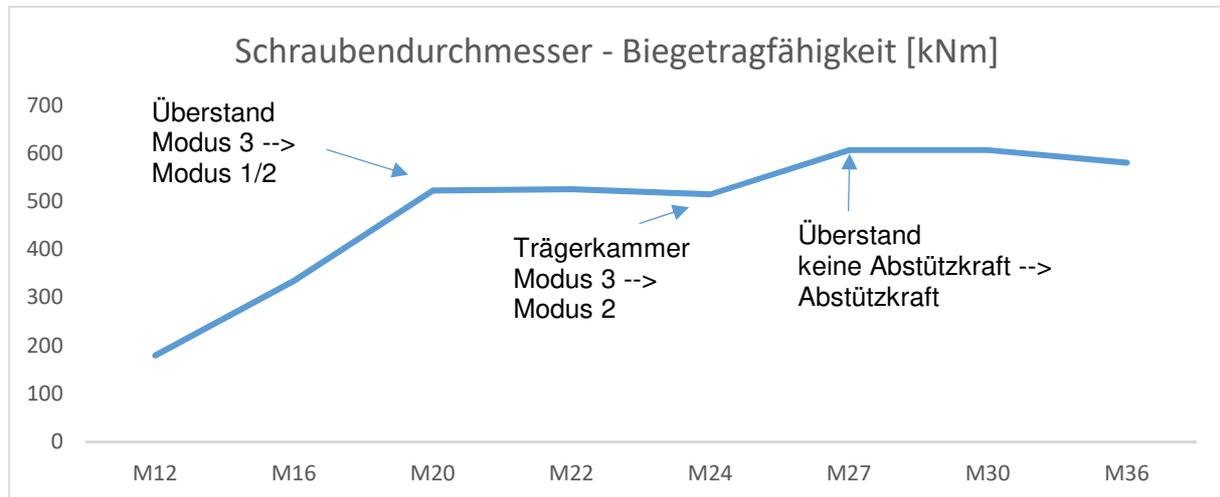


Diagramm 6: Abhängigkeit der Biegetragfähigkeit vom Schraubendurchmesser (Stoß ähnlich: Typisierte Verbindung Nr.497 HEA 400 IH4.1 $t_p=30\text{mm}$)

Schweißnaht

Die dritte in den verschiedenen Beispielen gewonnene Erkenntnis ist, dass die Erhöhung der Schweißnahtdicke die Biegetragfähigkeit negativ beeinflussen kann. Analog zum oben beschriebenen Übergang zwischen M24 und M27 Schraube, konnte für verschiedene Geometrien festgestellt werden, dass größere Schweißnähte aufgrund des verringerten Hebelarms m das Auftreten einer Abstützkraft verhindern und in Folge dessen die Tragfähigkeit verringern.

Typ.-Nr. 678 HEB 600 $t_p=30\text{mm}$ M24: 15mm-Flanschnaht: $M_{j,Rd} = 822\text{kNm}$ (Ringbuchgeom.)

Typ.-Nr. 678 HEB 600 $t_p=30\text{mm}$ M24: 12mm-Flanschnaht: $M_{j,Rd} = 948\text{kNm}$ (angepasst)

(Tragfähigkeit gemäß Typisierte Verbindungen $M_{j,Rd} = 859\text{kNm}$) [1]

7.2 Vergleich mit den typisierten Verbindungen

Nachfolgend werden die Beanspruchbarkeiten der in der dieser Arbeit vorgestellten Berechnungsmethode mit den Beanspruchbarkeiten nach Typisierten Anschlüssen [1] verglichen.

In Tabelle 7 sind für verschiedene bündige und überstehende 4-reihige Stirnplattenstöße die verschiedenen Mindestschweißnahtdicken und Biegebeanspruchbarkeiten erfasst. Berechnet sich nach einem Verfahren eine geringer Mindestschweißnahtdicke als für die jeweils andere Methode, wird diese grün hinterlegt. zusätzlich wurden auch die jeweils höheren Biegebeanspruchbarkeiten in grün hinterlegt.

Typ	Profil	Schr.	eigene Berechnung				Typisierte Verbindungen			
			as [mm]	af [mm]	M_{Rd} [kNm]	versagende Komponente	as [mm]	af [mm]	M_{Rd} [kNm]	versagende Komponente
IH2.1	HEA 300	M24	4	6	200	Steg auf Zug	4	7	182	Steg auf Zug
IH2.1	HEA 600	M27	7	8	665	Schrauben	5	10	596	Platte+Schraube
IH2.1	HEA 160	M16	3	5	44	Flansch auf Dr.	3	5	38	Flansch auf Dr.
IH2.1	HEB 200	M16	5	5	71	Platte+Schraube	5	6	61	Platte+Schraube
IH2.1	HEB 300	M24	5	6	222	Platte+Schraube	6	8	201	Platte+Schraube
IH2.1	IPE 600	M24	6	9	536	Schrauben	5	10	460	Schrauben
IH2.1	HEM 300	M30	8	9	404	Schrauben	11	13	317	Platte+Schraube
IH2.1	HEM 600	M30	8	10	829	Schrauben	7	13	670	Platte+Schraube
IH2.1	HEA 280	M20	4	5	138	Steg auf Zug	4	6	128	Steg auf Zug
IH4.1	HEA 300	M20	4	8	271	Platte+Schraube	5	10	285	Flansch auf Dr.
IH4.1	HEA 600	M27	5	15	1206	Platte+Schraube	5	16	1077	Flansch auf Dr.
IH4.1	HEB 300	M24	5	12	433	Flansch auf Dr.	6	13	408	Flansch auf Dr.
IH4.1	HEB 300	M20	4	8	275	Platte+Schraube	6	11	305	Platte+Schraube
IH4.1	HEM 300	M30	6	17	749	Platte+Schraube	10	21	735	Platte+Schraube
IH4.1	HEM 600	M30	6	18	1490	Platte+Schraube	7	21	1365	Platte+Schraube

Tabelle 7: Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den typisierten Verbindungen

Die Auswertung der oben dargestellten Tabelle 7 ermöglicht eine Bewertung der von Björn Schmidt [16] entwickelten und in dieser Arbeit erweiterten Berechnungsmethode.

Für den bündigen vierreihigen Stirnplattenstoß (IH2.1) liefert die Komponentenmethode höhere Biegebeanspruchbarkeiten und in der Regel auch kleinere Schweißnähte. Die Beanspruchbarkeiten sind im Mittel um ca. 15% höher als die in den Typisierten Verbindungen angegebenen Beanspruchbarkeiten. Zusätzlich sind die Schweißnähte um ca. 7% kleiner.

Der gewichteten Lastabtrag hat beim bündigen Stirnplattenstoß einen besonders positiven Einfluss.

Die Biegebeanspruchbarkeit der überstehenden vierreihigen Stirnplattenstöße (IH4.1) weicht von den Typisierten Anschlüssen nach oben und nach unten ab und ist im Durchschnitt ungefähr gleich groß. (+2%) Dass die überstehenden Stirnplattenstöße im Vergleich mit den

Typisierten Anschlüssen schlechter abschneiden ist auf die nicht auftretenden Abstützkräfte im Stirnplattenüberstand zurückzuführen.

Der HEA 300 mit M20-Schrauben und der HEB 300 mit M20-Schrauben sind die einzigen in Tabelle 7 aufgeführten IH4.1 Stöße ohne Abstützkräfte im Stirnplattenüberstand.

Besonders auffällig ist der Unterschied zwischen dem HEB 300 mit M24-Schrauben und dem HEB 300 mit M20-Schrauben. Wird der Stoß mit M20-Schrauben ausgeführt treten, wegen dem verringerten Abstand zum Flansch keine Abstützkräfte mehr im Stirnplattenüberstand auf und die Tragfähigkeit nimmt überproportional stark ab.

In der folgenden Tabelle sind die verschiedenen Unterschiede der Berechnungsmodelle zur Übersicht zusammengefasst worden.

Vergleich der drei Berechnungsmodelle			
Methode	Typisierte Verbindungen	Modell nach Björn Schmidt	von mir vorgestelltes Modell
Die Einzelkomponenten sind...	nicht veränderbar	veränderbar	veränderbar
Die Klemmlänge ermittelt sich mit ... Unterlegscheibe(n)	einer	zwei	zwei
Die Überprüfung ob im Stirnplattenüberstand eine Abstützkraft auftritt wird...	nicht durchgeführt	nicht durchgeführt	durchgeführt
Die Beanspruchbarkeit des Stegs	wird einfach berücksichtigt	wird nur für den Lastabtrag zum Steg berücksichtigt	wird nur für den Lastabtrag zum Steg berücksichtigt
Die Schweißnahtdicken	werden vorgegeben	-	werden für den Lastabtrag zum Steg / Flansch einzeln richtungsbezogen ermittelt
Druckkomponente	Flansch	Flansch + Steganteil	Flansch + Steganteil
Querkraft	V_{Rd} wird angegeben	-	Interaktion (Schraubenzug; Stegstreckgrenze; Schweißnaht)
Normalkraft	-	-	Zug- / Druck-Interaktion

Tabelle 8: Vergleich der typisierten Verbindungen mit dem Modell nach Björn Schmidt und dem in dieser Arbeit von mir erweiterten Modell

8 Fazit

Mit dieser Arbeit werden die Grundlagen der Berechnung von momententragfähigen Stirnplattenstößen nach der Komponentenmethode beschrieben. Die Herleitung zur Abstützkraft sowie die Ermittlung der verschiedenen Beanspruchbarkeiten aus den Einzelkomponenten ermöglichen ein grundlegendes Verständnis des Tragverhaltens von zweireihigen Stirnplattenstößen. Die aufgeführten Interaktionsnachweise machen das Bemessungsmodell für die Baupraxis anwendbar. (vgl. 2)

Die für den zweireihigen Stoß erstellten Abbildungen der Fließlinienmuster und die Herleitung der effektiven Fließlinienlänge des nicht kreisförmigen Fließlinienmusters machen die Dissertation von Dr.-Ing. Björn Schmidt [16] leichter verständlich.

Der von Björn Schmidt eingeführte und von mir auf den zweireihigen Stirnplattenstoß übertragene gewichtete Lastabtrag erlaubt eine genaue Berücksichtigung der Stegbeanspruchbarkeit und bietet die Grundlage für die Bemessung der Schweißnähte. (vgl. 3)

Mit den gewonnenen Erkenntnissen über den zweireihigen Stirnplattenstoß wird Dr.-Ing. Björn Schmidts Erweiterung der Komponentenmethode auf den vierreihigen Stirnplattenstoß umfassend erläutert. Anhand von verschiedenen Abbildungen wird die Herleitung des nicht kreisförmigen Fließmusters neben einer Steife und der gewichtete Lastabtrags anschaulich dargestellt. (vgl. 5)

Die ausgearbeiteten Flussdiagramme vereinfachen das Anfertigen der verschiedenen Beispielrechnungen. Dennoch ließ sich feststellen, dass das vorgestellte Rechenmodell auf Grund des Umfangs für eine Handrechnung nur schlecht geeignet ist. Aus diesem Grund wurden die weiteren Berechnungsergebnisse über eine besser geeignete Excel-Programmierung erstellt. (vgl. 4 und 6)

Die Parameteruntersuchung hat aufgezeigt, dass die Möglichkeit einzelne Komponenten verändern zu können ein entscheidender Vorteil der Komponentenmethode ist. Mit der Komponentenmethode kann der Stirnplattenstoß hinsichtlich der Beanspruchungen und konstruktiven Randbedingungen optimiert werden. (vgl. 7.1)

Die Auswertung der Beispiele hat ergeben, dass sich mit der auf den vierreihigen Stoß erweiterte Komponentenmethode für viele Stirnplattenstöße höhere Tragfähigkeiten und kleinere Schweißnahtdicken als in den Typisierten Anschlüssen [1] ermitteln lassen. (vgl. 7.2)

Der vorgestellte Nachweis eignet sich als Excel-Programmierung sehr gut für eine Verwendung in der Praxis.

9 Literaturverzeichnis

- [1] Stahlbau Verlags- und Service GmbH, Typisierte Anschlüsse im Stahlhochbau nach DIN EN 1993-1-8, Düsseldorf: Stahlbau Verlags- und Service GmbH, 2013.
- [2] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN 1993-1-8 Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen, Berlin: Beuth Verlag, 2009.
- [3] M. Petersen, Stahlbau2-2016.pdf, Buxtehude, 2016.
- [4] G. Wagenknecht, Stahlbau-Praxis nach Eurocode 3 - Band 2 Verbindungen und Konstruktionen, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2011.
- [5] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, Berlin: Beuth Verlag, 2015.
- [6] F. Wald, Z. Sokol und J.-P. Jaspart, Base Plate in Bending and Anchor Bolts in Tension, Delft: Heron Publishing, 2008.
- [7] J.-P. Jaspart, Etude de la semi-rigidite des noeuds poutre-colonne et son influence sur la resistance et la stabilite des ossatures en acier, Liege: Universite de Liege - faculte des sciences appliquees, 1191.
- [8] J.-P. Jaspart und K. Weynand, Design of Joints in Steel and Composit Structures, Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, 2016.
- [9] D. Ungermann und S. Schneider, „1 Stahlbaunormen DIN EN 1993-1-8: Bemessung von Anschlüssen,“ in Stahlbaukalender 2013: Eurocode 3 - Anwendungsnormen, Stahl im Anlagenbau, Ernst & Sohn GmbH & Co. KG., 2013.
- [10] D. Ungermann und B. Brune, Berechnung und Konstruktion von momententragfähigen Anschlüssen nach DIN EN 1993-1-8, Dortmund: Technische Universität Dortmund, 2014.
- [11] U. Kuhlmann, Stahlbau-Kalender 2011, Berlin: Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, 2011.
- [12] D. Ungermann, R. Puthil, T. Ummenhofer und K. Weynand, Eurocode 3 Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten Band 2: Anschlüsse Kommentar und Beispiele, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2015.
- [13] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN 1993-1-1 Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, Berlin: Beuth Verlag, 2010.
- [14] P. Zoetemeijer, a design method for the tension side of statically loaded, bolted beam-to-column connections, Delf, Netherlands: Heron Publishing, 1974.
- [15] D. Ungermann und S. Schneider, Stahlbaukalender 2012: Grundnormen, Brücken 4 Stahlbaunormen Kommentar zur DIN EN 1993-1-8: Bemessung von Anschlüssen, Berlin: Ernst & Sohn GmbH und Co. KG., 2012.
- [16] B. Schmidt, Zum Tragverhalten von geschraubten momententragfähigen Stirnplattenverbindungen mit 4 Schrauben in jeder Schraubenreihe, Dortmund: Fakultät Bauwesen der Technischen Universität Dortmund, 2008.
- [17] D. Ungermann, K. Weynand, J.-P. Jaspart und B. Schmidt, Stahlbaukalender 2005 4 Momententragfähige Anschlüsse mit und ohne Steifen, Berlin: Ernst & Sohn GmbH und Co. KG., 2005.
- [18] Deutscher Stahlbau-Verband, Typisierte Anschlüsse im Stahlhochbau, Düsseldorf: Stahlbauverlagsgesellschaft, 2002.

- [19] G. Sedlacek, K. Weyanand und R. Klinkhammer, Typisierte Anschlüsse im Stahlhochbau - Band 2, Düsseldorf: DSTV, 2002.

10 Flussdiagramme

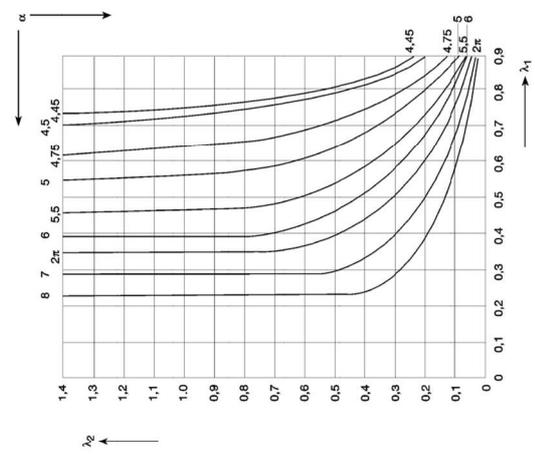
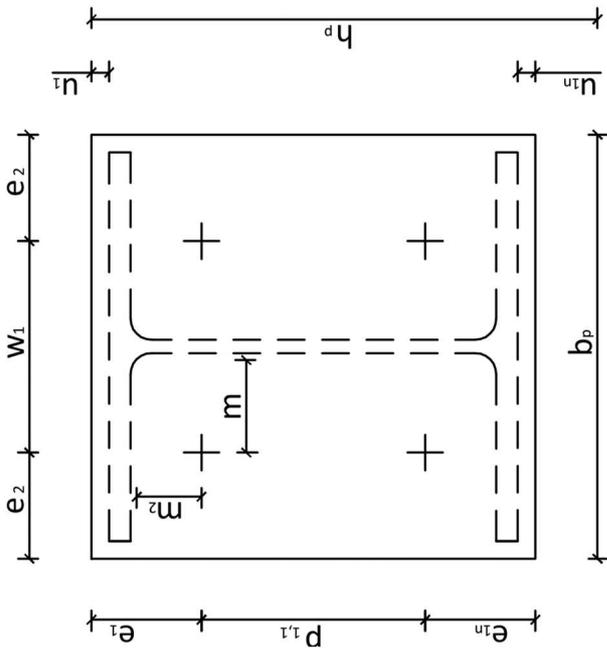
Die auf den folgenden Seiten vorliegenden Flussdiagramme stellen eine Arbeitshilfe für die in dieser Arbeit berechneten Beispiele dar.

Mit ihnen lässt sich das Grenzmoment für den bündigen und überstehenden zweireihigen und vierreihigen Stoß berechnen.

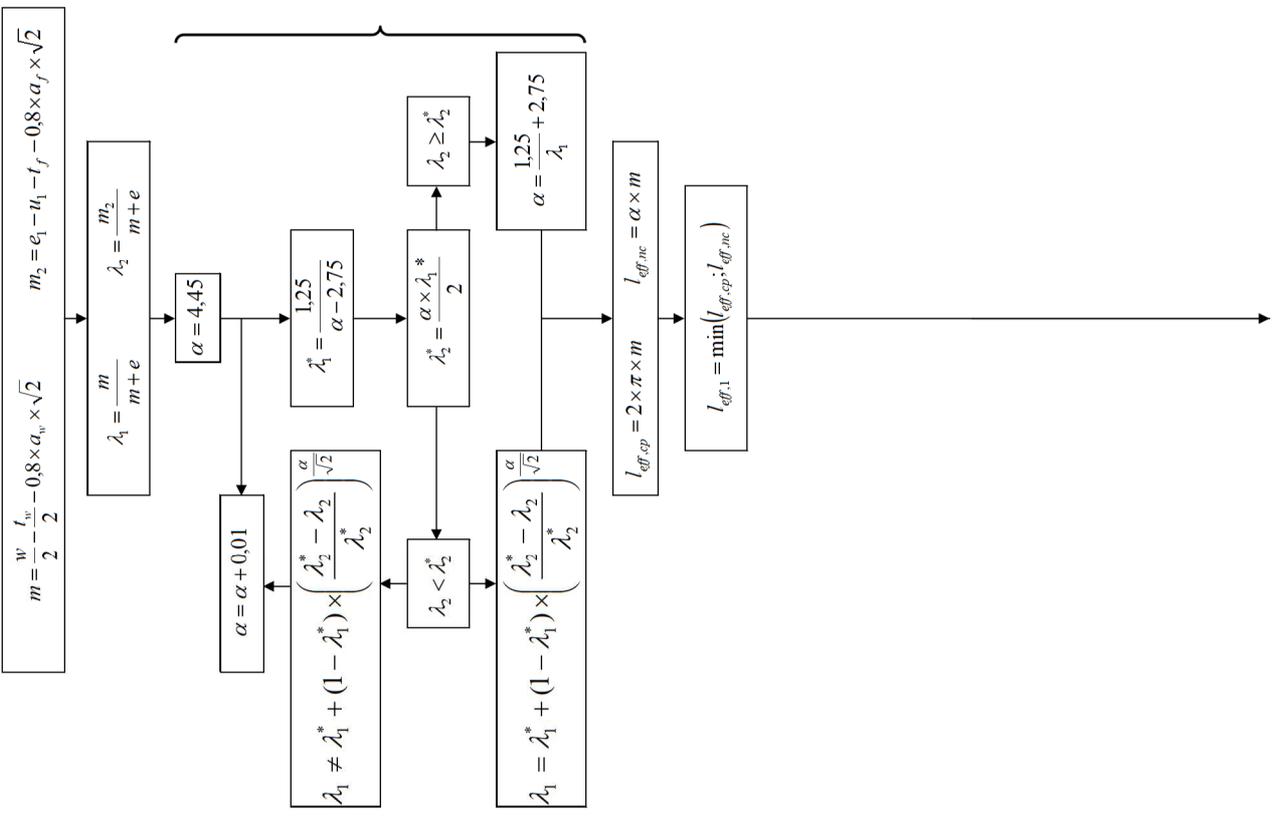
Die erstellten Flussdiagramme sind:

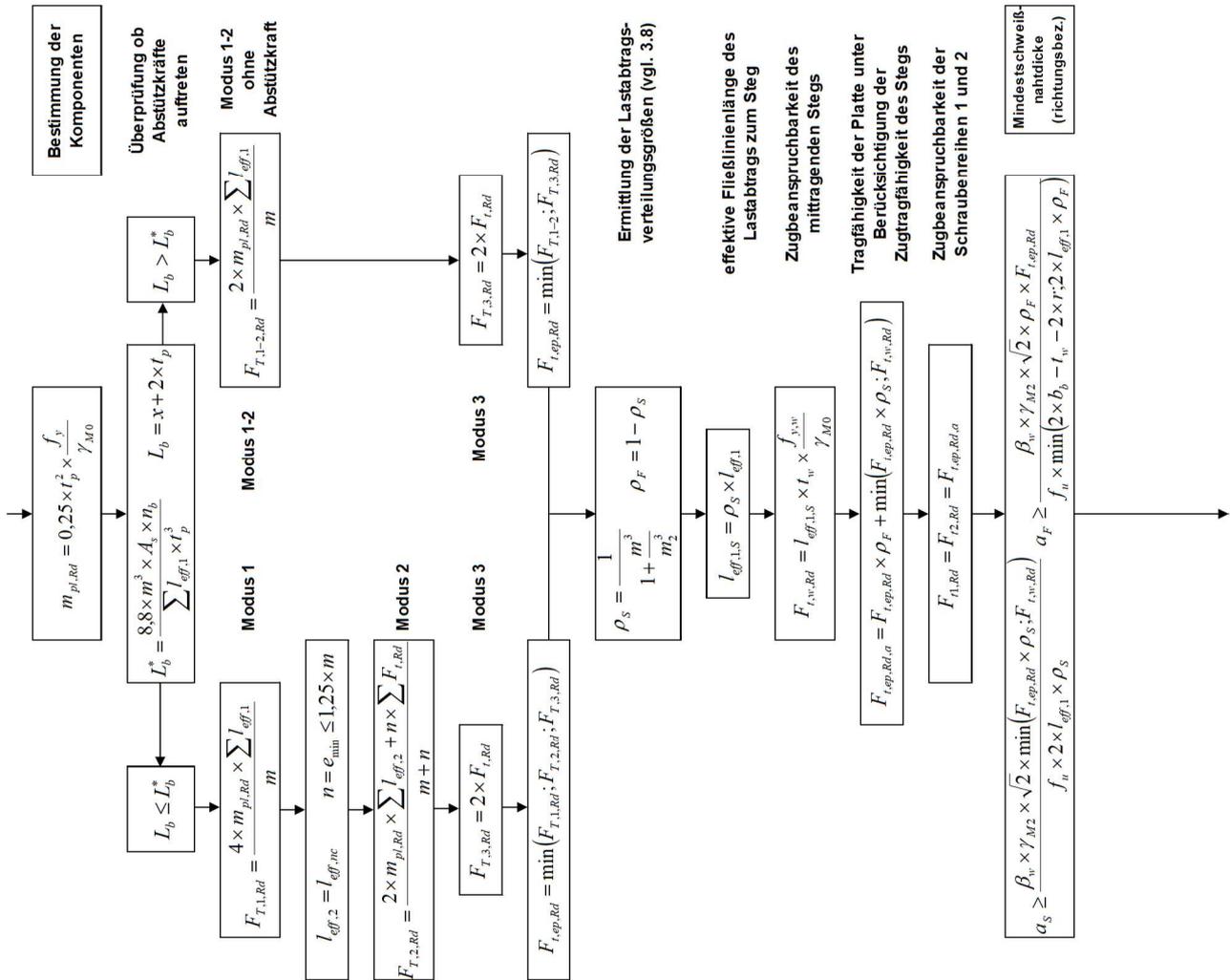
- Flussdiagramm 2-reihiger bündiger Stoß
- Flussdiagramm 2-reihiger überstehender Stoß
- Flussdiagramm 4-reihiger bündiger Stoß
- Flussdiagramm 4-reihiger überstehender Stoß

10.1 Flussdiagramm 2-reihiger bündiger Stoß



Bestimmung der Fließlinienlänge



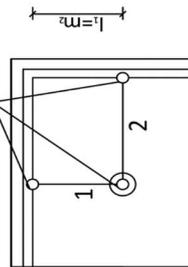


Faktor 8,8 gemäß Herleitung (vgl. 2.2.2.2)

Schraubengröße	X [cm]
M12	1,5
M16	1,95
M20	2,25
M24	2,55
M27	2,95
M30	3,15
M36	3,8

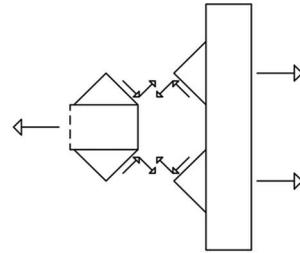
$$x = 2 \times t_u + \frac{t_k}{2} + \frac{t_m}{2}$$

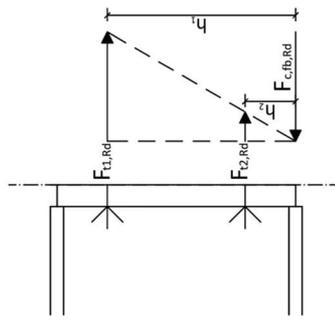
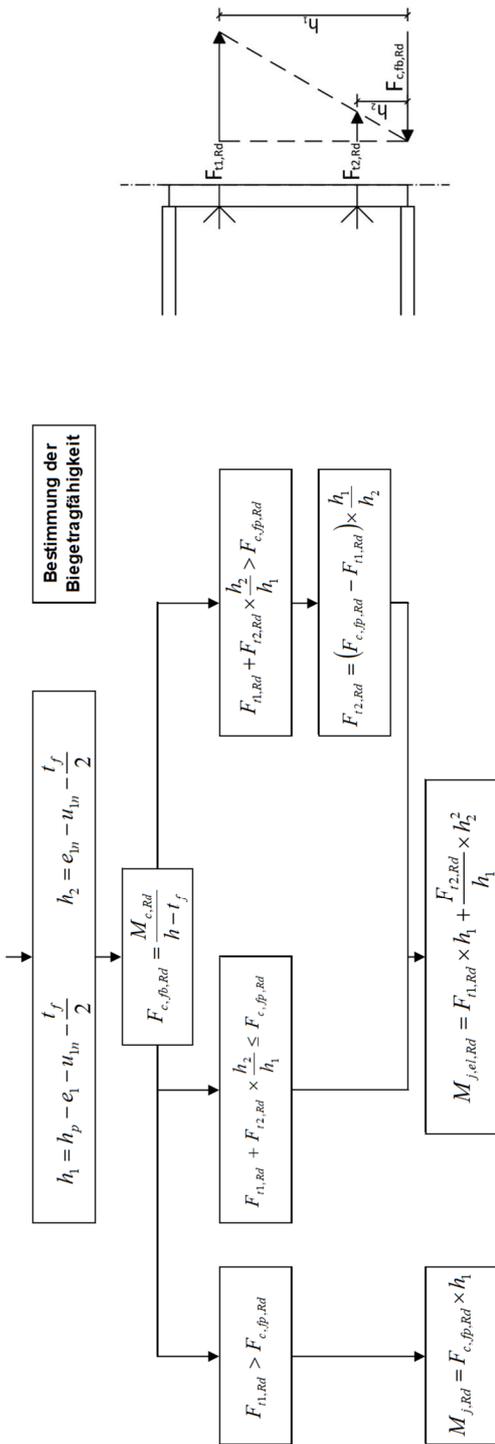
Fließgelenk



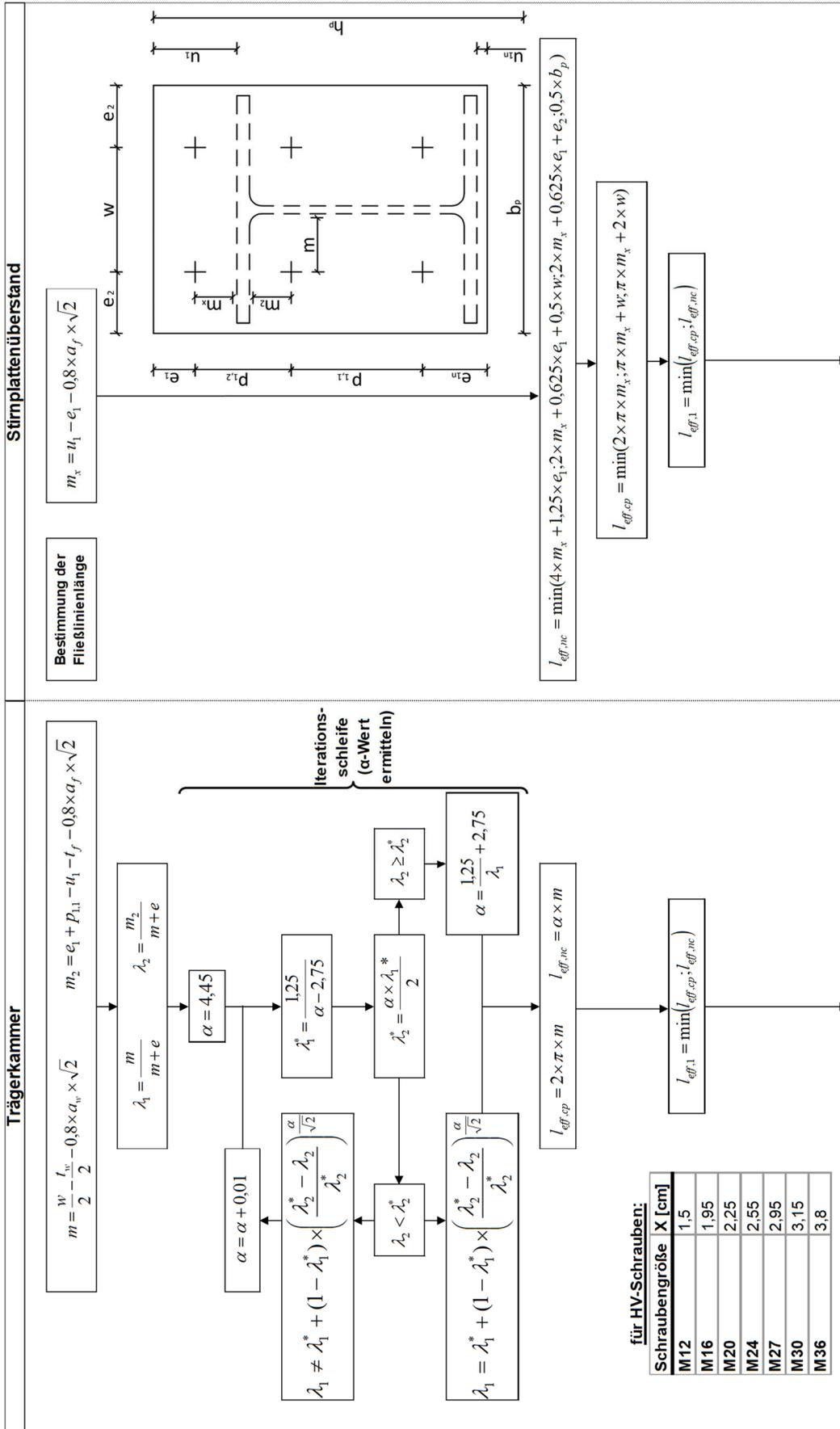
Anmerkung:
 $F_{n,Rd} \neq F_{T,1,Rd}$

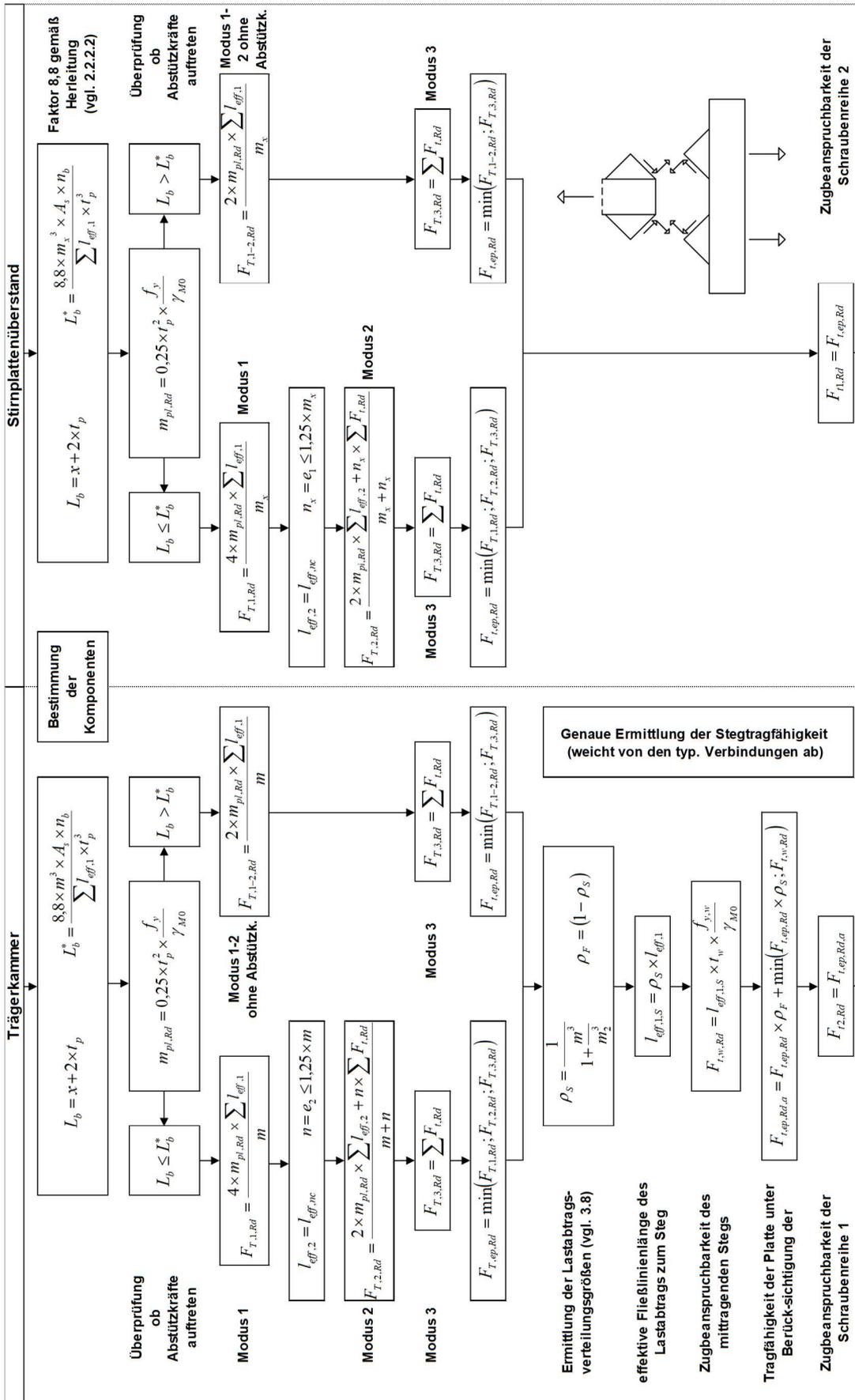
Zugbeanspruchbarkeit der Schraubenreihe 1
Versagensmodus 1 für das T-Stummel Modell

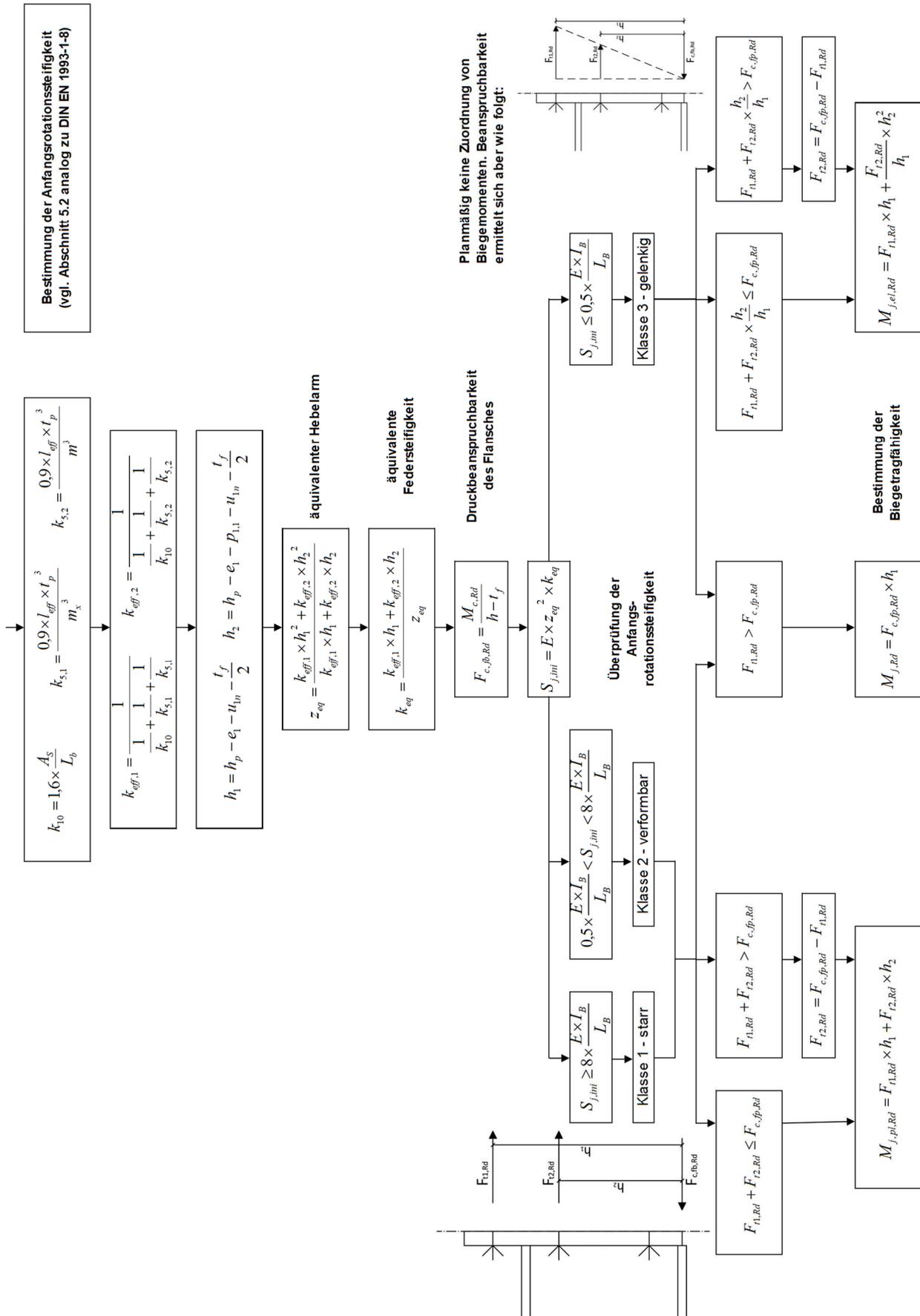




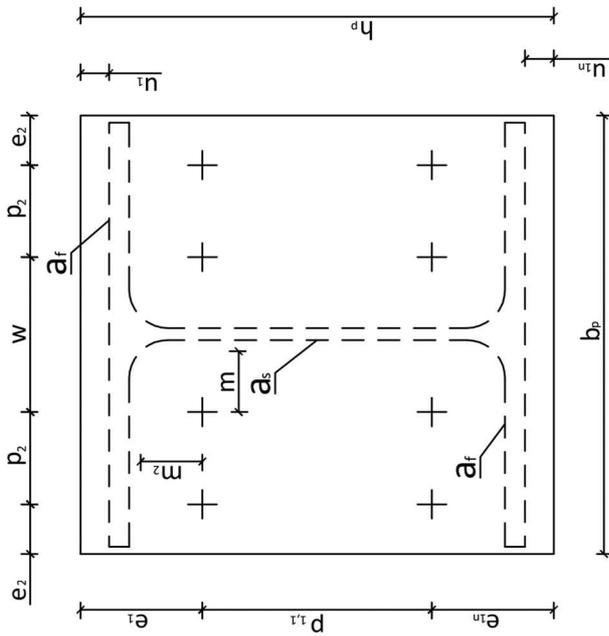
10.2 Flussdiagramm 2-reihiger überstehender Stoß



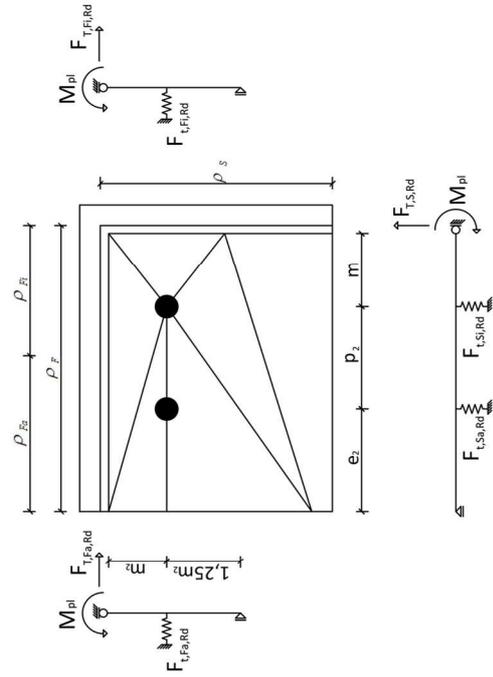




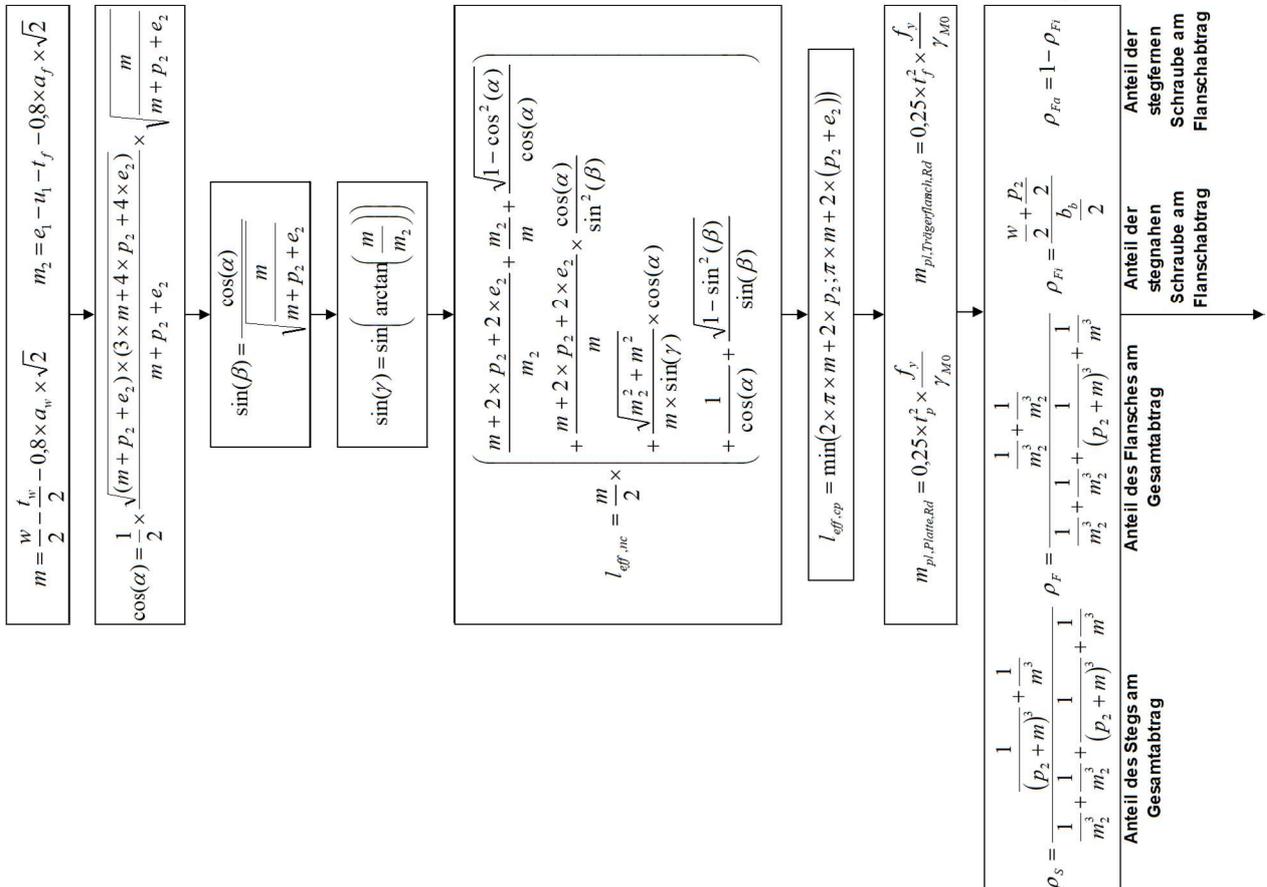
10.3 Flussdiagramm 4-reihiger bündiger Stoß

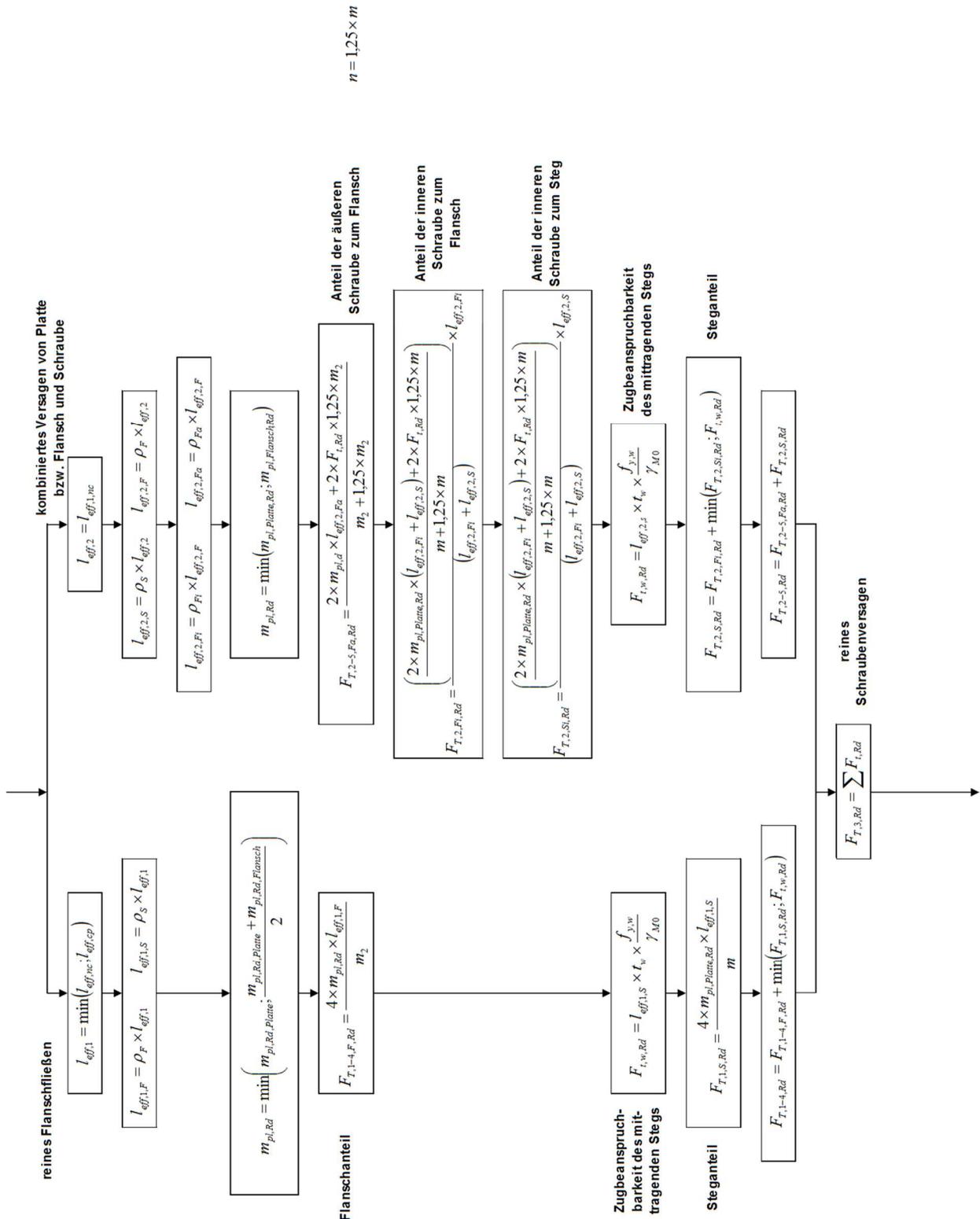


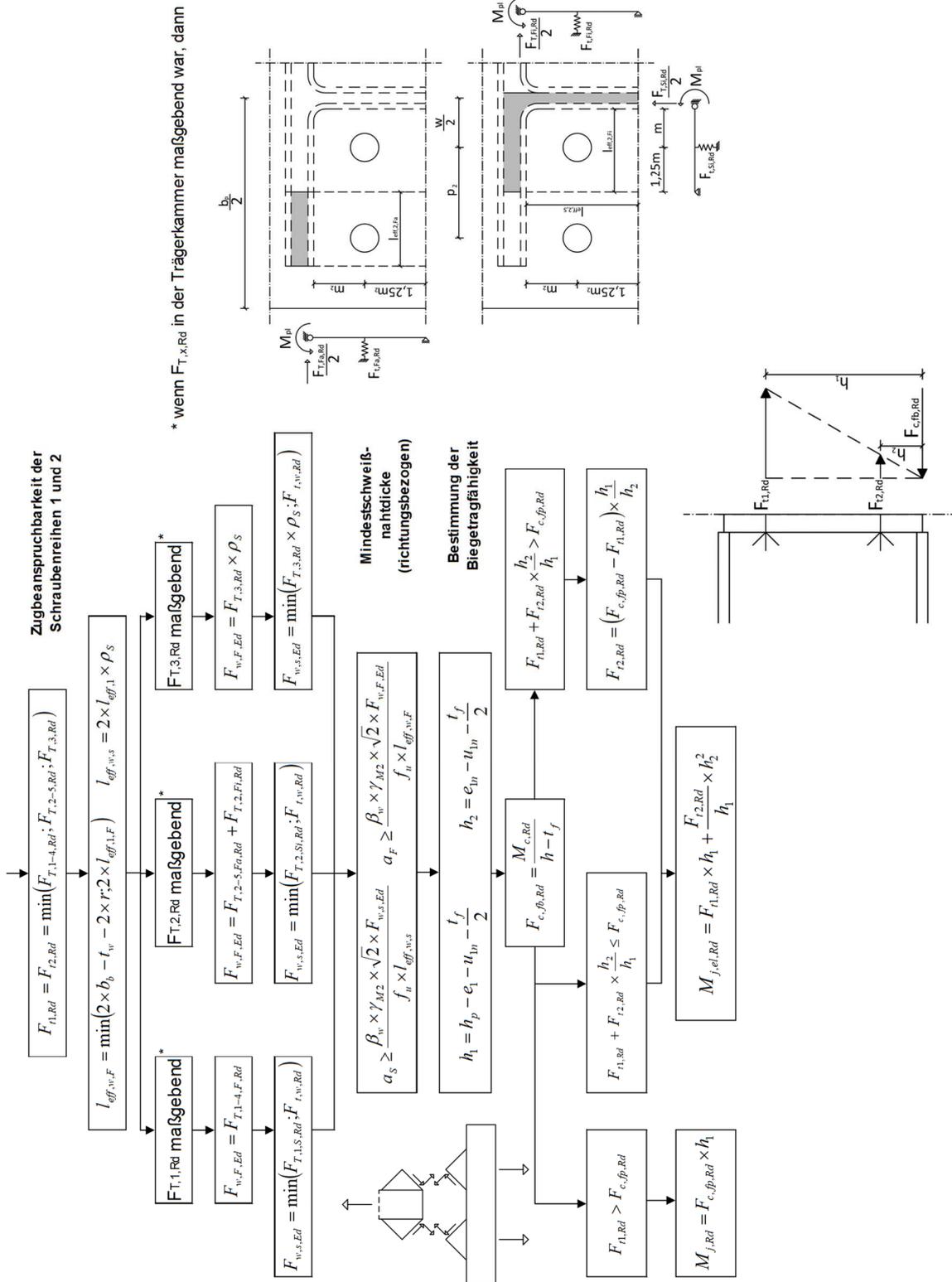
Ermittlung der
Fließlinienlänge
für das nicht
kreisförmige
Muster



Lastabtrags-
gewichtungsfaktoren







10.4 Flussdiagramm 4-reihiger überstehender Stoß

